



TUGAS AKHIR TF 141581

**PERANCANGAN SENSOR BEBAN MENGGUNAKAN
SERAT OPTIK BERSTRUKTUR *MULTIMODE-
SINGLEMODE-MULTIMODE* (MSM) UNTUK SISTEM
WEIGH IN MOTION (WIM)**

**SAFARANI RIZKIYAH
NRP. 2412 100 083**

**Dosen Pembimbing
Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**



FINAL PROJECTTF 141581

**DESIGN OF A LOAD SENSOR BASED ON MULTIMODE-
SINGLEMODE-MULTIMODE (MSM) FIBER STRUCTURE
FOR WEIGH IN MOTION SYSTEM (WIM)**

**SAFARANI RIZKIYAH
NRP. 2412 100 083**

**Supervisors :
AgusMuhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTEMENT
Faculty of IndustrialTechnology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**

LEMBAR PENGESAHAN
PERANCANGAN *SENSOR* BEBAN MENGGUNAKAN
SERAT OPTIK BERSTRUKTUR *MULTIMODE-*
***SINGLEMODE-MULTIMODE* (MSM) UNTUK SISTEM**
WEIGH IN MOTION (WIM)


TUGAS AKHIR

Oleh

Safarani Rizkiyah
NRP 2412 100 083

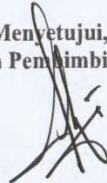
Surabaya, 19 Juli 2016

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M. Sc.
NIPN. 19500402 197901 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan
 Teknik Fisika FTI-ITS



Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN
PERANCANGAN SENSOR BEBAN MENGGUNAKAN
SERAT OPTIK BERSTRUKTUR *MULTIMODE-*
SINGLEMODE-MULTIMODE (MSM) UNTUK SISTEM
WEIGH IN MOTION (WIM)





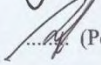
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Fotonika
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SAFARANI RIZKIYAH
NRP 2412 100 083

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.  (Pembimbing I)
2. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M. Sc.  (Pembimbing II)
3. Dr.rer.Nat.Ir.Aulia M.T.Nasution, M.Sc.  (Ketua Penguji)
4. Detak Yan Pratama, S. T., M. Sc.  (Penguji I)
5. Arief Abdurrahman S.T., M.T.  (Penguji II)

SURABAYA
2016

**PERANCANGAN *SENSOR* BEBAN MENGGUNAKAN SERAT
OPTIK BERSTRUKTUR *MULTIMODE-SINGLEMODE-
MULTIMODE* (MSM) UNTUK SISTEM *WEIGH IN MOTION*
(WIM)**

Nama Mahasiswa : Safarani Rizkiyah
NRP : 2412 100 083
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph. D.
2. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc

Abstrak

Pada tugas akhir ini telah dilakukan investigasi sensor beban untuk sistem *weigh-in-motion* menggunakan serat optik berstruktur MSM (*Multimode-Singlemode-Multimode*) secara eksperimen. Serat optik yang digunakan adalah serat optik *singlemode step-index* *corning* SMF -28 dan *multimode graded index*. Serat optik disambung dengan menggunakan *fussion splicer* *Sumitomo Electric*. Pengujian sensor dilakukan dengan menggunakan cahaya laser dengan panjang gelombang 1550 nm. Pada tahap awal sebelum melakukan percobaan menggunakan beban dinamis, digunakanlah beban statis terlebih dahulu untuk melihat respon sensor beban MSM jika dikenai beban. Tahap selanjutnya ditentukan panjang serat optik optimal yang akan digunakan untuk pengukuran beban dinamis. Panjang serat optik yang digunakan adalah serat optik dengan panjang *singlemode* 0,5 cm, 1 cm dan 1,5 cm. Dari hasil pengujian diperoleh serat optik dengan panjang *singlemode* 0,5 cm memiliki sensitivitas yang paling tinggi yaitu 0,0083 dBm/kg. Tahap selanjutnya yaitu melakukan pengujian menggunakan beban dinamis dengan panjang *singlemode* 1 cm. Beban dinamis yang digunakan adalah motor dengan variasi berat yang berbeda. Juga dilakukan pengujian dengan menggunakan variasi kecepatan. Kecepatan yang digunakan adalah 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam. Dari hasil percobaan diperoleh bahwa jika beban dinamisnya bergerak dengan kecepatan yang semakin tinggi maka perubahan daya yang terukur akan semakin kecil begitupula sebaliknya. Hal ini disebabkan oleh waktu kontak antara sensor dan beban.

Kata kunci: *Weigh-in-motion*, serat optik berstruktur MSM

**DESIGN OF A LOAD SENSOR BASED ON MULTIMODE-
SINGLEMODE-MULTIMODE(MSM) FIBER STRUCTURE FOR
WEIGH-IN-MOTION SYSTEM(WIM)**

Name : Safarani Rizkiyah
NRP : 2412 100 083
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : 1. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph. D.
2. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.

Abstract

In this final project, it has been investigated of a load sensor based on a multimode-singlemode-multimode (MSM) fiber structure for weigh-in-motion system experimentally. In the experimental, a step-index Corning SMF-28 is spliced between two multimode graded-index using a Fusion Splicer Sumitomo Electric. The MSM fiber structure's is tested using a light source wavelength of 1550 nm. Before sensor tested using dynamic load, a system is tested using static load to investigate the response. The next stage is determined optimal length of optical fiber to be used for dynamic load measurement. The length of optical fiber that is used is a singlemode optical fiber with a length of 0.5 cm, 1 cm and 1.5 cm. The results show that MSM fiber structure has different characteristics for various singlemode fiber lengths. From the test results singlemode optical fiber with a length of 0.5 cm have the highest sensitivity is 0.0083 dBm / kg. The next stage is to test dynamic loads using singlemode with a length of 1 cm. Dynamic load used is vehicle with a different weight variation and also be tested using speed variation. The speed are 5 km / h, 10 km / h and 15 km / h. The experimental results showed that if the load speed is high then measured changes in power is small. if the velocity of vehicle is low so the change of power is high. This is caused by the contact time between the sensor and the load

Keywords : WIM System, MSM structure

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
COVER	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sensor	7
2.2 <i>Weigh-In-Motion (WIM)</i>	9
2.3 Sensor Beban Untuk Sistem <i>Weigh-in-motion</i>	10
2.4 Serat Optik	11
2.5 <i>Singlemode Fiber</i>	14
2.6 Serat <i>Optik Graded-index</i>	14
2.7 Serat Optik Berstruktur <i>Multimode-Singlemode-Multimode (MSM)</i>	16
2.8 Morfologi Serat Optik Ketika Diberi Beban	18
2.9 Efek Beban Pada Serat Optik MSM	19
2.10 Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Untuk Sistem <i>Weigh-in-Motion (WIM)</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Studi Literatur	25
3.2 Perancangan Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur MSM	25
3.3 Penentuan Parameter-Parameter Sensor Beban	

Berstruktur MSM.....	25
3.4 Pembuatan Serat Optik MSM Sebagai Sensor Beban.....	27
3.5 <i>Set-Up</i> Eksperimen Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur MSM.....	28
3. 6 Analisis Data dan pembahasan.....	29
3.7 Perumusan Kesimpulan.....	29
3.8 Penyusunan Laporan	29
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil dan Analisa Pengujian Sensor Beban Serat Optik Berstruktur MSM Untuk Beban Statis	31
4.2 Hasil dan Analisa Pengujian Sensor Beban Menggunakan Serat Optik berstruktur MSM Untuk Beban Dinamis.....	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

		Hal
Tabel 2.1	Karakteristik dan perbandingan sensor WIM	10
Tabel 4.1	Karakteristik statik sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM	36
Tabel 4.2	Persamaan garis sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dengan variasi panjang <i>singlemode</i>	36
Tabel 4.3	Karakteristik sensor beban untuk puncak pertama ($\Delta P_{out\ 1}$)	44
Tabel 4.4	Karakteristik sensor beban untuk puncak kedua ($\Delta P_{out\ 2}$)	47
Tabel 4.5	Karakteristik sensor beban untuk pjumlah puncak total ($\Delta P_{out\ 1} + \Delta P_{out\ 2}$)	51

DAFTAR GAMBAR

		hal
Gambar 2.1	Elemen-elemen sistem pengukuran	
Gambar 2.2	Struktur serat optik	12
Gambar 2.3	Panjang gelombang dengan atenuasi untuk serat optik silika	12
Gambar 2.4	Bentuk geometri, profil indeks bias dan tipe perambatan sinar (a) serat optik <i>Multimode Step-Index</i> , (b) serat optik <i>Singlemode</i> , (c) serat optik <i>Multimode Graded-index</i>	13
Gambar 2.5	Geometri dan profil indeks bias serat optik <i>graded-index</i>	15
Gambar 2.6	Profil indeks bias $n^2(r)$ untuk variasi nilai p	16
Gambar 2.7	Struktur <i>multimode</i> – <i>singlemode</i> – <i>multimode</i>	16
Gambar 2.8	Penjalaran cahaya pada serat optik MSM	17
Gambar 2.9	(a) Gaya transversal yang mengenai serat optik terdistribusi uniform (b) gaya transversal yang mengenai serat optik terpusat di tengah	19
Gambar 2.10	Perambatan cahaya pada serat optik ketika dikenai beban	20
Gambar 2.11	Interaksi antar proses pembebanan pada serat optik	21
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian tugas akhir	24
Gambar 3.2	Dimensi pelat besi (a) tampak atas (b) tampak samping	26
Gambar 3.3	Penyambungan struktur MSM	28
Gambar 3.4	Skema sensor beban	

Gambar 3.5	Skema pengujian beban dinamis	28
Gambar 4.1	Hasil pengujian beban statis pada serat optik MSM dengan panjang <i>singlemode</i> 0,5 cm	28
Gambar 4.2	Hasil pengujian beban statis pada serat optik MSM dengan panjang <i>singlemode</i> 1 cm	32
Gambar 4.3	Hasil pengujian beban statis pada serat optik MSM dengan panjang <i>singlemode</i> 1,5 cm	33
Gambar 4.4	Hubungan antara daya keluaran dengan waktu dalam pengujian sensor beban berstruktur MSM	34
Gambar 4.5	Hubungan daya keluaran dengan waktu ketika beban melewati sensor dengan kecepatan yang berbeda	39
Gambar 4.6	Hubungan variasi berat dengan daya output untuk kecepatan yang berbeda (puncak pertama ($\Delta P_{out\ 1}$))	40
Gambar 4.7	<i>Range</i> beban yang menghasilkan perubahan daya linier untuk $\Delta P_{out\ 1}$ (a) kecepatan 5km/jam (b) kecepatan 10 km/jam (c) kecepatan 15 km/jam	41
Gambar 4.8	Hubungan daya output dengan variasi berat untuk kecepatan yang berbeda (puncak kedua ($\Delta P_{out\ 2}$))	43
Gambar 4.9	<i>Range</i> beban yang menghasilkan perubahan daya linier untuk $\Delta P_{out\ 2}$ (a) kecepatan 5km/jam (b) kecepatan 10 km/jam (c) kecepatan 15 km/jam	45
Gambar 4.10	Hubungan daya output dengan variasi berat untuk kecepatan yang berbeda (puncak pertama dan kedua ($\Delta P_{out\ 1}$ dan $\Delta P_{out\ 2}$))	46
		48

Gambar 4.11 *Range* beban yang menghasilkan perubahan daya linier untuk total $\Delta P_{out\ 1}$ dan $\Delta P_{out\ 2}$ (a) kecepatan 5km/jam (b) kecepatan 10 km/jam (c) kecepatan 15 km/jam

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Monitoring beban kendaraan bermotor merupakan hal penting yang harus dilakukan dalam rangka menjaga keselamatan dan keamanan transportasi. Seperti, menghindari terjadinya kecelakaan lalu lintas yang diakibatkan oleh rusaknya jalan, jembatan roboh dan lain sebagainya yang merupakan dampak dari muatan berlebih kendaraan yang melewati jalan tersebut. Maka dari itu sensor beban diperlukan untuk mengukur berat beban kendaraan yang melintasi suatu jalan supaya sesuai dengan kapasitas berat yang dapat diterima oleh jalan tersebut sehingga terhindar dari hal-hal seperti yang telah disebutkan diatas. Sensor beban dalam suatu sistem pengukuran beban merupakan kunci dari perangkat sistem pengukuran tersebut.

Saat sekarang ini metode konvensional yang masih digunakan untuk mengetahui berat kendaraan yang melintasi suatu jalan yaitu dengan melakukan penimbangan secara statis, seperti penggunaan jembatan timbang. Pengukuran beban kendaraan secara statis ini tidak dapat melakukan pengukuran untuk tiap-tiap *axle* kendaraan secara terpisah (Cheng, dkk., 2007).

Salah satu solusi dalam pengukuran beban kendaraan adalah dengan menggunakan sistem *weigh in motion* (WIM) yang telah diperkenalkan sejak 50 tahun yang lalu. WIM merupakan suatu sistem yang digunakan untuk mengukur berat kendaraan yang sedang melintasi suatu jalan atau struktur sewaktu kendaraan tersebut bergerak. Banyak keuntungan yang dapat diperoleh dengan melakukan pengukuran berat kendaraan menggunakan sistem WIM jika dibandingkan dengan pengukuran secara statis, diantaranya dapat menghemat biaya dan waktu. Dengan menggunakan sistem WIM, kendaraan yang akan ditimbang beratnya tidak perlu berhenti, sehingga lalu lintas tidak akan terganggu. Sedangkan jika dilakukan pengukuran secara statis kendaraan yang akan diukur beratnya harus berhenti sehingga

tidak cocok digunakan ketika lalu lintas sedang ramai dan dapat menyebabkan kemacetan lalu lintas. Penimbangan secara statis ini memerlukan waktu sekitar 10 – 30 menit atau lebih (Jacob, 2010). Sistem pengukuran beban berjalan (WIM) terdiri dari sensor dan peralatan pemrosesan data (Szary, 2009).

Sensor baban berjalan (WIM) yang digunakan saat sekarang ini diantaranya sensor pizoelektrik, *bending plate*, dan *load cell*. Sensor-sensor ini memiliki beberapa kekurangan karena bekerja dengan dasar sinyal elektrik sehingga mudah terinterferensi medan magnet dan mempunyai rugi daya yang besar untuk transmisi jarak jauh. Sensor-sensor ini juga mudah terkorosi, memiliki akurasi yang rendah, ukurannya yang besar dan harganya yang mahal. Maka dikembangkan lah sensor beban berbasis serat optik. Sensor serat optik memiliki beberapa kelebihan yaitu akurasi tinggi, tidak terpengaruh interferensi gelombang elektromagnetik, sensitivitas tinggi, tidak mudah terkorosi, tahan terhadap suhu tinggi, tekanan yang tinggi, biayanya yang murah dan strukturnya yang sederhana (Li, Xiangyang, 2012).

Sensor beban menggunakan serat optik telah banyak diteliti dan dikembangkan diantaranya, pada tahun 2012 telah dilakukan penelitian tentang desain sensor beban kendaraan menggunakan teknik mikrobending serat optik. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sumber cahaya laser 1310 nm, serat optik *multimode* dan modul data akuisisi DT9816S. *Reducer* tekanan yang digunakan untuk melindungi serat optik adalah lapisan semen beton, lembaran karet dan *silicon rubber*. Serta penggunaan kawat baja untuk menghasilkan *bending* pada serat optik. Penelitian ini telah menghasilkan sensor beban yang mampu membaca beban sampai dengan 15 kN ($\pm 1,5 \text{ ton}$) (Setiono, 2012).

Pada tahun 2014 juga telah dilakukan perancangan sensor beban berbasis serat optik *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) menggunakan *high density polyethylen*. Padapenelitian ini pengujian sensor dilakukan dengan cara mengukur perubahan daya keluaran serat optik SMS akibat perubahan beban yang

diberikan. Sensitivitas sensor yang dihasilkan adalah 0,0018 dBm/N dan mempunyai linieritas pada rentang 1765,26 N-3922,8 N. (Puspita, 2014).

Selain itu pada tahun 2015 juga telah dilakukan perancangan sensor beban berstruktur SMS dengan memanfaatkan mikrobending dengan *bendingmodulator* yang digunakan adalah *high density polyethylen*. Pada penelitian ini pengujian performansi sensor dilakukan dengan mengukur daya keluaran sensor karena pengaruh parameter seperti panjang serat optik SMS, panjang busur tekukan dan jumlah pin *microbender* yang digunakan pada penelitian ini. Hasilnya didapatkan bahwa daya keluaran terbesar diperoleh dengan menggunakan tiga buah pin *microbender* yaitu 2,33 dBm, sensitivitas tertinggi sensor adalah 0,0051 dBm/kg untuk pembebanan dengan rentang massa 0-370 kg dengan menggunakan beban statis serta panjang serat optik multimode yang digunakan adalah 12,29 cm (Rahmah, 2015).

Selain serat optik dengan struktur seperti diatas serat optik berstruktur *multimode-singlemode-multimode* (MSM) juga berpotensi untuk menjadi sensor. Serat optik berstruktur MSM ini memiliki struktur yang lebih *compact* jika dibandingkan dengan serat optik berstruktur SMS dalam rentang spektrum yang sama dan berpotensi untuk menghasilkan sifat-sifat yang lebih homogen (Yin Bin, 2016). MSM merupakan struktur serat optik yang terdiri dari serat optik *singlemode* yang berperan sebagai elemen sensor dan disambungkan dengan serat optik *multimode* pada kedua ujungnya. Sensor MSM ini memanfaatkan interferensi yang terjadi antara moda *core* dan moda *cladding* pada serat optik *singlemode* (Wo Jianghai, 2013).

Penelitian sensor serat optik berstruktur MSM ini juga telah banyak dilakukan diantaranya pada tahun 2008 dilakukan penelitian tentang penggunaan serat optik MSM yang memiliki bentuk yang *simple*, biaya yang murah, dapat bekerja pada temperatur tinggi dan memiliki sensitifitas yang tinggi. Pada penelitian ini diperoleh sensor MSM dengan sensitivitas mencapai 0,088 nm/°C dan dapat mengukur temperatur sampai 900 °C (Nguyen, 2008).

Pada tahun 2016 telah dilakukan penelitian tentang pembuatan sensor berstruktur MSM untuk pengukuran tegangan dan temperatur. Pada penelitian tersebut dilakukan variasi pada panjang serat optik *singlemode* dan *multimode* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap keluaran sensor. Setelah menemukan struktur yang bagus barulah dilakukan pengukuran terhadap regangan dan temperatur dengan beragam variasi. Regangan yang diberikan mulai dari rentang 0-2000 $\mu\epsilon$ dan temperatur yang diberikan mulai dari 10 -70 °C. Dari percobaan yang dilakukan diperoleh sensitifitas sensor dengan struktur MSM sebesar 0,7096 pm/ $\mu\epsilon$ dan 44,12 pm/°C (Yin, 2016).

Maka dari itu pada penelitian ini akan dirancang sensor serat optik dengan struktur *Multimode-Singlemode-Multimode* (MSM) yang akan diaplikasikan sebagai sensor beban berjalan (*Weigh-in Motion*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah bagaimana merancang sensor beban menggunakan serat optik berstruktur *multimode-singlemode-multimode* (MSM) untuk sistem *weigh in motion* (WIM).

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dilakukannya penelitian tugas akhir ini adalah untuk mendapatkan rancangan sensor beban menggunakan serat optik berstruktur *multimode-singlemode-multimode* (MSM) untuk sistem *weigh in motion* (WIM).

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan permasalahan, maka batasan masalah dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini diantaranya adalah:

- a. Serat optik MSM yang dirancang dianggap tidak mengalami pergeseran.

- b. Material penahan beban yang digunakan adalah steel-36 dan karet PVC yang telah diberi *groove*.
- c. Panjang gelombang sumber cahaya yang digunakan dalam pengujian sensor adalah 1550 nm.
- d. Berat kendaraan yang diukur adalah kendaraan roda 2.
- e. Kecepatan kendaraan atau beban dinamis bergerak adalah 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam.

1.5 Manfaat Penelitian

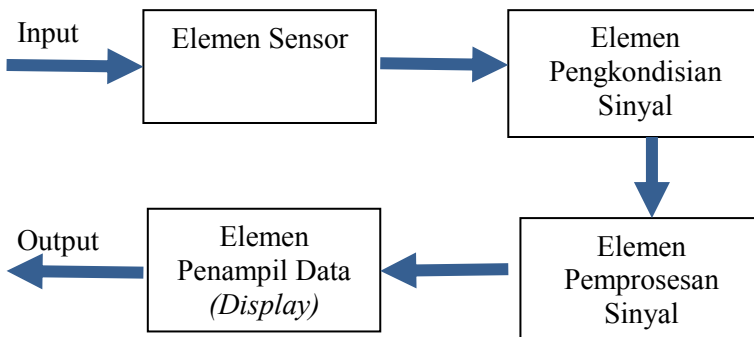
Berdasarkan latar belakang dan tujuan yang telah dipaparkan maka manfaat dari pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah memberikan analisa pengaruh serat optik berstruktur *multimode-singlemode-multimode* (MSM) jika digunakan sebagai sensor beban untuk sistem *weigh in motion* (WIM). Selain itu evaluasi hasil rancangan dapat digunakan atau dikembangkan untuk mengukur berat kendaraan roda empat yang melintasi satu jalan dengan sistem *weigh in motion* (WIM).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori yang digunakan sebagai penunjang dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir terkait sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM untuk sistem WIM. Teori penunjang yang dipaparkan mengenai sensor, *weigh-in-motions*, sensor beban untuk sistem *weigh-in-motion*, serat optik, step index fiber, graded index fiber, MSM dan mekanika serat optik ketika diberikan beban.

2.1 Sensor

Sistem pengukuran terdiri dari beberapa elemen penyusun. Secara umum terdapat empat elemen penyusun. Elemen pertama dalam sistem tersebut adalah sensor. Sensor adalah elemen sistem yang berhubungan langsung dengan proses dan menghasilkan suatu variabel keluaran dalam bentuk tertentu bergantung pada variabel masukannya (Bolton W, 2006). Pada penelitian tugas akhir ini digunakan sensor serat optik dengan variabel keluaran berupa daya (dBm) dimana, perubahan daya keluarannya bergantung kepada berat beban yang diberikan. Berikut merupakan elemen-elemen penyusun suatu sistem pengukuran dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Elemen-elemen sistem pengukuran (Bentley, 1995)

a. *Range*

Range adalah karakteristik dari suatu sensor yang merupakan nilai minimum, maksimum input dan output sensor tersebut (I_{min} , I_{maks} , O_{min} , O_{maks})

b. *Span*

Span adalah rentang nilai input dan nilai output suatu sensor.

$$Span \text{ input} = I_{maks} - I_{min} \quad (2.1)$$

$$Span \text{ output} = O_{maks} - O_{min} \quad (2.2)$$

c. *Linieritas*

Linieritas adalah karakteristik ideal sensor. Sensor dikatakan linier jika nilai input dan outputnya terletak pada suatu garis lurus. *Linieritas* dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$O - O_{min} = \left[\frac{O_{maks} - O_{min}}{I_{maks} - I_{min}} \right] (I - I_{min}) \quad (2.3)$$

$$O_{ideal} = KI + a \quad (2.4)$$

dengan:

$$K = \text{slope garis lurus ideal} = \frac{O_{maks} - O_{min}}{I_{maks} - I_{min}}$$

$$a = \text{intercept garis lurus ideal} = O_{min} - KI_{min}$$

d. *Sensitifitas*

Sensitivitas adalah perbandingan antara perubahan output (ΔO) dengan perubahan input (ΔI) suatu sensor. *Sensitivitas* dapat dinyatakan dalam persen dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\text{Sensitifitas (\%)} = \left[\frac{O_{maks} - O_{min}}{I_{maks} - I_{min}} \right] \times 100 \% \quad (2.5)$$

e. Resolusi

Resolusi adalah perubahan maksimum input tanpa menyebabkan perubahan nilai output. Secara matematis resolusi ditulis sebagai berikut :

$$\text{Resolusi} = \frac{\Delta I_R}{I_{\text{maks}} - I_{\text{min}}} \quad (2.6)$$

ΔI_R adalah perubahan input sensor.

2.2 *Weigh in Motion*(WIM)

Sistem *Weigh in Motion* didesain untuk melakukan pengukuran beban kendaraan ketika kendaraan tersebut berjalan. Dengan menggunakan prinsip WIM untuk pengukuran beban kendaraan, kendaraan tersebut tidak perlu berhenti sehingga pengukurannya lebih efektif dan tidak menyebabkan kemacetan lalu lintas. Selama 5 dekade ini berbagai sistem WIM telah dikembangkan dan sangat bermanfaat untuk membantu dalam hal *design*, konstruksi, perawatan dan pengambilan keputusan tentang jalan raya.

Jika dibandingkan dengan pengukuran berat kendaraan roda ban kendaraan dari permukaan atas akan sebanding dengan gaya kebawah yang diberikan (arah vertikal) tanpa pergerakan, pengukuran berat kendaraan dengan menggunakan prinsip WIM dilakukan ketika kendaraan tersebut bergerak, dilakukan secara cepat dan *instant*. Berat kendaraan tidak berubah ketika kendaraan tersebut bergerak, tetapi gaya dinamik yang diberikan dari roda yang berputar ke permukaan jalan lah yang beragam (Y Elena, dkk., 2003). Gaya dinamik yang dihasilkan dari roda ketika kendaraan bergerak lah yang diukur dan dijadikan dasar untuk menentukan berat statis kendaraan tersebut. Sistem WIM terdiri dari sensor serta peralatan untuk mengumpulkan dan menganalisa data. Sensor mendeteksi adanya kendaraan yang bergerak melalui suatu jalan dan berhubungan dengan efek dinamik yang dihasilkan oleh masing-masing ban, *axle* atau kumpulan *axle* dari kendaraan yang bergerak pada waktu tertentu.

Data-data yang terbaca oleh sensor akan dikumpulkan dan diproses untuk menentukan berat kendaraan (Szary, dkk.,2009).

WIM merupakan sistem pengukuran beban yang sangat berpotensi, karena memiliki beberapa kelebihan diantaranya dapat mengurangi biaya dan meningkatkan akurasi pengukuran beban kendaraan di jalan jika dibandingkan dengan sistem pengukuran sebelumnya yang memiliki biaya yang relatif mahal (Jazi, dkk.,1990).

2.3 Sensor Beban Untuk Sistem *Weigh in Motion*

Sensor beban untuk sistem *Weigh in Motion* merupakan elemen pendeteksi adanya kendaraan yang bergerak melalui suatu jalan dan berhubungan dengan efek dinamik yang dihasilkan oleh masing-masing ban, *axle* atau kumpulan *axle* dari kendaraan yang bergerak pada waktu tertentu (Szary, dkk.,2009). Saat sekarang ini ada beberapa macam sensor yang telah digunakan untuk melakukan pengukuran beban kendaraan di jalanan. Berikut penjelasan tentang beberapa sensor beban yang telah digunakan tersebut:

a. Sensor Piezoelektrik

Sensor piezoelektrik terbuat dari material yang akan menghasilkan arus ketika dikenai suatu beban dan ketika sensornya mengalami deformasi. Ketika bahan kristal polarisasi dikenai suatu tekanan maka akan mengakibatkan material tersebut terdeformasi dan menghasilkan arus listrik. Arus yang dihasilkan akan menghasilkan tegangan yang nilainya sesuai dengan berat beban yang diberikan (Cheng Lu, dkk., 2007).

b. Bending Plate

Sistem WIM menggunakan *bending plate* dilengkapi dengan *strain gauge*. Ketika kendaraan melewati *bending plate* maka sistem mengukur tekanan yang dihasilkan dengan menggunakan *strain gauge* serta menghitung beban dinamikanya (Cheng Lu, dkk., 2007).

c. *Load Cell*

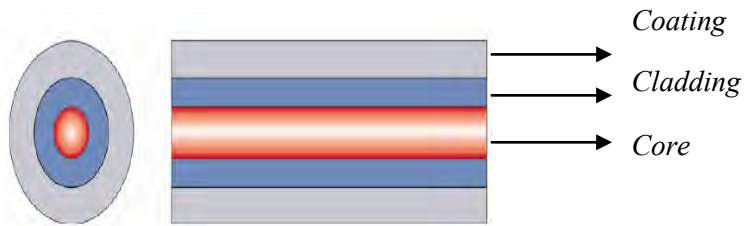
Pada sistem WIM, *load cell* dipasang disetiap sudut sensor. Sehingga ketika ada kendaraan yang melewati *load cell* ini maka sistem akan mengukur berat kendaraan tersebut (Cheng Lu, dkk., 2007).

d. Serat Optik

Serat optik dapat digunakan dalam melakukan pengukuran berat beban berjalan (WIM). Komponen-komponen penting yang diperlukan jika menggunakan serat optik sebagai sensor adalah sumber cahaya, serat optik, *optical detector* dan *optical modulator* (Mimbela, dkk., 2003). Sensor beban menggunakan serat optik memanfaatkan *loss* yang tercipta karena adanya tekanan yang dikenai pada serat optik sehingga mempengaruhi intensitas serta perambatan cahaya pada serat optik itu sendiri. Hal ini disebut rugi-rugi transmisi cahaya. Besarnya rugi-rugi yang ditimbulkan tersebut sebanding dengan berat beban yang dikenai pada serat optik atau sensor serat optik dan digunakan untuk mendeteksi beban kendaraan (Setiono, dkk., 2013).

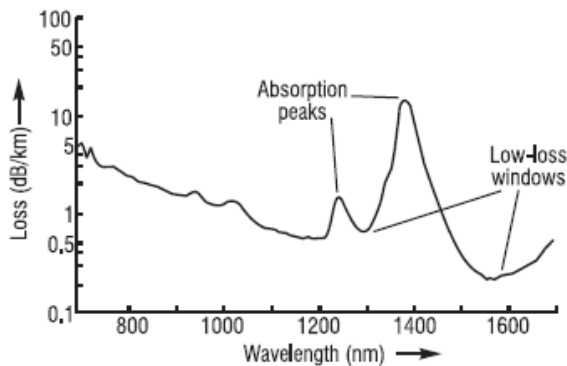
2.4 Serat Optik

Serat optik merupakan pemandu gelombang silindris dielektrik yang terbuat dari material *low-loss* seperti plastik maupun gelas silica. Serat optik terdiri dari *core*(inti), *cladding* dan *coating*. Core adalah bagian inti dimana cahaya dipandu. Cladding adalah selubung *core* yang berfungsi memantulkan cahaya kembali kedalam *core* dan melindungi *core* serat optik. *Core* dan *Cladding* sama-sama terbuat dari silika tetapi dengan komposisi yang berbeda. *Core* memiliki indeks bias lebih tinggi daripada *cladding*. Coating adalah selubung *non-optis* berupa polimer yang menyelubungi *cladding*, berfungsi untuk melindungi silika dari kerusakan akibat gangguan fisik maupun lingkungan. Struktur serat optik dapat dilihat pada gambar 2.2..



Gambar 2.2 Struktur serat optik

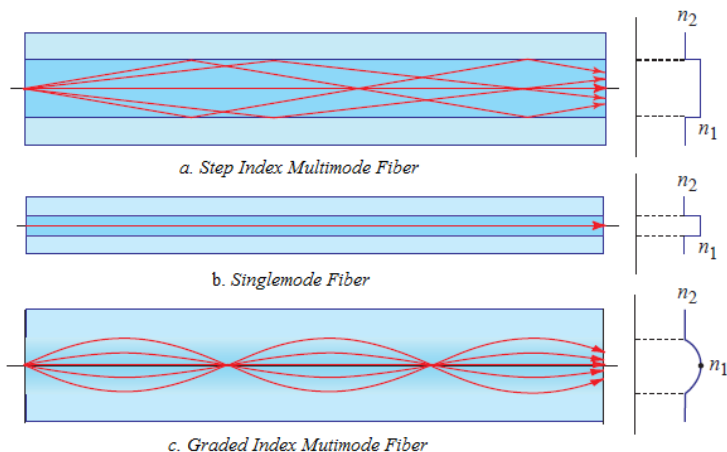
Sinar yang masuk pada *boundry core-cladding* dengan sudut yang lebih besar daripada sudut kritis akan mengalami peristiwa *total internal reflection* dan akan dipandu melalui *core* tanpa mengalami pembiasan (Kao, 2009). Sinar yang menjalar pada serat optik akan mengalami atenuasi. Atenuasi merupakan fungsi dari panjang gelombang cahaya yang dinyatakan dalam dB/km.



Gambar 2.3 Panjang gelombang dengan atenuasi untuk serat optik silika (Ghatak, 2000)

Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa ada 2 panjang gelombang yang mempunyai nilai minimum. Pertama dengan panjang gelombang sekitar 1300 nm mempunyai koefisien *loss* sebesar 1 dB/km. Kedua dengan panjang gelombang 1550 nm dengan koefisien loss sebesar 0,2 dB/km.

Berdasarkan moda yang dapat merambat serta ukuran diameter *core* nya serat optik terbagi menjadi dua yaitu serat optik *singlemode* dan serat optik *multimode*. Serat optik dengan diameter *core* yang kecil yaitu sekitar 5- 10 *mikron* dan hanya satu moda saja yang dapat merambat disebut serat optik *singlemode*. Sedangkan serat optik yang mempunyai diameter *core* yang lebih besar yaitu 10 kali lebih besar dari diameter *core* *singlemode* berkisar antara 50 – 62,5 *mikron* disebut serat optik *multimode*. Tipe perambatan sinar pada *core* serat optik dibagi dua yaitu *step-index* dan *graded-index*. Serat optik *graded index* memiliki nilai indeks bias maksimum pada bagian tengah *core* dan nilainya berangsur-angsur turun hingga mencapai nilai indeks bias minimum pada *core-cladding boundary*. Sedangkan serat optik *step index* memiliki nilai indeks bias yang konstan. Bentuk geometri, profil indeks bias dan tipe perambatan sinar pada serat optik dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Bentuk geometri, profil indeks bias dan tipe perambatan sinar (a) serat optik *multimode step-index*, (b) serat optik *singlemode*, (c) serat optik *multimode graded-index*(Kao, 2009)

2.5 Singlemode Fiber

Serat optik *singlemode* memiliki diameter *core* yang kecil yaitu sekitar 5- 10 *mikron* dan hanya satu moda saja yang dapat merambat. Serat optik *singlemode* tidak menimbulkan efek modal dispersion karena perambatan cahayanya hanya melalui satu jalur saja.

Perbedaan nilai indeks bias antara *core* dan *cladding* serat optik *step-index* adalah sangat kecil, sehingga fraksi perubahan indeks biasanya juga sangat kecil. Fraksi perubahan indeks bias dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini (Kumar, 2003).

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.7)$$

Dengan n_1 adalah indeks bias *core* dan n_2 adalah indeks bias *cladding*.

Peristiwa propagasi gelombang cahaya di dalam serat optik *step-index* akan memunculkan parameter V. Parameter V atau *V-number* adalah parameter penentu jumlah moda dan konstanta perambatan cahaya didalam serat optik (Wiley, 1991). Secara matematis parameter V dapat diketahui menggunakan persamaan 2.2 berikut ini.

$$V = \sqrt{(NA)^2 k_0^2 a^2} = 2\pi \frac{a}{\lambda} \cdot NA \quad (2.8)$$

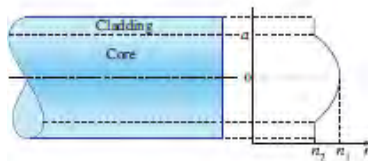
Serat optik *singlemode* mempunyai nilai parameter V kurang dari 2,405. Pada serat optik *singlemode* hanya terbentuk 1 moda saja yaitu moda fundamental LP_{01} di dalam penjalaran cahayanya. Sehingga semua moda dapat terpandu kedalam inti serat optik mealui satu jalur saja (Wiley, 1991). Oleh karena itu pada serat optik *singlemode* tidak terjadi *modal dispersion*.

2.6 Serat Optik Graded-Index

Pada serat optik *multimode*, cahaya merambat dengan kecepatan berbeda sehingga menghasilkan variasi *travel*

times yang menyebabkan pulsa cahaya mengalami pelebaran setelah melewati serat optik. Karena terjadinya pelebaran pulsa maka timbullah efek *modal dispersion*. Untuk mengurangi efek *modal dispersion* ini maka digunakanlah serat optik yang memiliki nilai indeks bias tinggi dibagian tengah dan semakin kecil ketika mendekati *cladding*. Serat optik dengan indeks bias seperti ini disebut serat optik *graded index*.

Indeks bias core serat optik *graded index* sebagai fungsi $n(r)$ dari posisi radial r . Nilai $n(r)$ terbesar terletak pada bagian pusat *core* yaitu $n(0) = n_1$, dan nilainya semakin kecil hingga mencapai jari-jari terluar *core* saat $r=a$ yaitu $n(a) = n_2$. Indeks bias *cladding* memiliki nilai yang konstan yaitu n_2 .



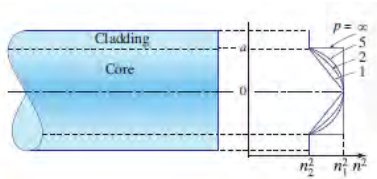
Gambar 2.5 Geometri dan profil indeks bias serat optik *graded-index* (Kao, 2009)

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^p \Delta \right], \quad r \leq a, \quad (2.9)$$

dimana

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.10)$$

p adalah parameter profil grade yang menentukan kecuraman dari profil. Fungsi ini dimulai dari n_1 pada $r = 0$ sampai n_2 pada $r = a$. Untuk $p=1$, $n^2(r)$ adalah linier, dan untuk $p=2$, $n^2(r)$ adalah kuadratik. Untuk $p \rightarrow \infty$, $n^2(r)$ merupakan fungsi step. Profil indeks bias dengan variasi nilai p dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Profil indeks bias $n^2(r)$ untuk variasi nilai p (Kao, 2009)

2.7 Serat Optik Berstruktur *Multimode-Singlemode-Multimode* (MSM)

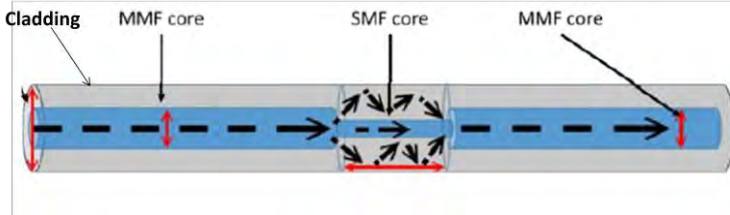
Serat optik berstruktur MSM merupakan serat optik yang terdiri dari dua buah serat optik *multimode* identik yang disambung secara aksial pada kedua ujung serat optik *singlemode*. Serat Optik MSM dapat digunakan sebagai sensor karena memiliki beberapa keuntungan yaitu bentuknya yang sederhana, *compactness*, resolusi dan presisi yang tinggi serta biayanya yang murah. Struktur serat optik MSM dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Struktur *multimode-singlemode-multimode*

Pada serat optik MSM yang menjadi daerah sensor adalah serat optik *singlemode*. Sedangkan serat optik *multimode* nya bertindak sebagai *moda splitter* dan *moda combiner* (Yin, dkk., 2016). Serat optik MSM memanfaatkan interferensi yang terjadi antara *moda core* dan *moda cladding* pada serat optik *singlemode*. Cahaya merambat dari sumber cahaya lalu menuju *multimode* pertama. *Multimode* pertama atau *lead-in-MMF* menggabungkan *fundamental core mode* dari *lead in MMF* menuju *moda core* dan *cladding* SMF. Hal ini dikarenakan adanya ketidakcocokan atau perbedaan diameter yang besar antara diameter *core* serat optik *multimode* dan *singlemode* (Sun An,

2012). Sehingga ketika cahaya ditransmisikan dari serat optik multimode ke serat optik singlemode, sebagian cahaya akan bocor dari core MMF ke bagian cladding SMF dan akan teradiasi sehingga mengalami *loss*. Selanjutnya cahaya merambat menuju *multimode* kedua atau *lead-out-MMF*. Interferensi antara moda *core* dan moda *cladding* terjadi pada *lead-out* MMF. Moda *cladding* pada SMF akan digabung kembali dengan moda *core* menjadi guided modes pada MMF kedua. Penjalaran cahaya pada serat optik MSM dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut ini



Gambar 2.8 Penjalaran cahaya pada serat optik MSM (Garcia, dkk., 2014)

Karena adanya perbedaan *optical path* dari moda *core* dan moda *cladding* yang merambat pada bagian SMF maka terjadilah perbedaan fase antara moda *core* dan moda *cladding*. Perbedaan fase antara moda *core* dan moda *cladding* setelah melewati serat optik *singlemode* dapat dihitung dengan persamaan 2.5 berikut.

$$\phi^m = \frac{2\pi(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad,m})L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{eff}^m L}{\lambda} \quad (2.11)$$

dengan:

Δn_{eff}^m = Perbedaan indeks bias efektif antara moda *core* dan moda *cladding*

L = Panjang serat optik *singlemode*

λ = Panjang gelombang yang merambat pada serat optik

Jarak antara dua panjang gelombang yang ber interferensi (FSR) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.6 berikut :

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff}^m L} \quad (2.12)$$

dengan :

$\Delta\lambda$ = Jarak antara dua panjang gelombang yang berinterferensi

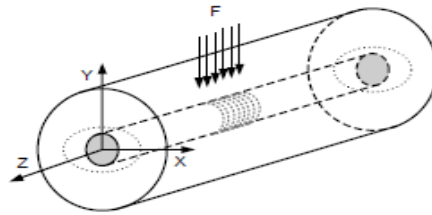
L = Panjang serat optik *singlemode*

λ = Panjang gelombang yang merambat pada serat optik

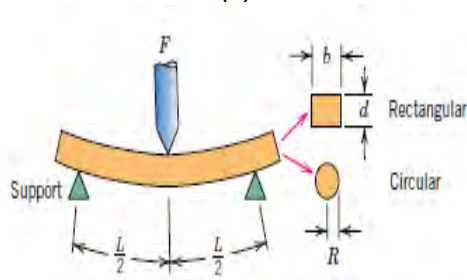
Serat optik berstruktur MSM mempunyai nilai Δn_{eff} yang besar jika dibandingkan dengan serat optik berstruktur SMS (*Singlemode-Multimode-Singlemode*) karena interferensi yang terjadi merupakan interferensi antara moda core dan moda cladding. Jika nilai perbedaan indeks bias efektifnya besar maka nilai FSR (Free Spectral Range) nya kecil sehingga sensor yang dihasilkan memiliki struktur yang lebih *compact*. Selain itu pengukurannya juga lebih sederhana karena nilai FSR yang kecil.

2.8 Morfologi Serat Optik Ketika Diberi Beban

Ketika serat optik dikenai suatu gaya maka akan terjadi perubahan pada serat optik. Serat optik akan memberikan respon dengan dua kemungkinan yaitu pertama luas penampang melintang serat optik menjadi berbentuk lonjong (*ellips*) dan yang kedua serat optik akan mengalami deformasi. Luas penampang serat optik akan berbentuk lonjong (*ellips*) jika serat optik dikenai gaya transversal yang terdistribusi *uniform*. Serat optik akan mengalami deformasi ketika serat optik tersebut dikenai gaya transversal yang terpusat di tengah. Deformasi yang dialami serat optik akibat gaya transversal yang diberikan baik secara *uniform* ataupun terpusat dapat dilihat pada gambar 2.9.



(a)



(b)

Gambar 2.9 (a) Gaya transversal yang mengenai serat optik terdistribusi uniform (Urban, 2010) (b) gaya transversal yang mengenai serat optik terpusat di tengah (Callister, 2009)

Flexural strength dari serat optik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan

$$\sigma_{fs} = \frac{F_{fs}L}{\pi R^3} \quad (2.13)$$

dimana :

F_{fs} = beban yang mengenai serat optik

L = panjang serat optik

R = radius serat optik

2.9 Efek Beban Pada Serat Optik MSM

Ketika serat optik dikenai gangguan dari luar seperti tekanan maka akan terjadi perubahan indeks bias pada serat optik. Perubahan indeks bias ini akan menyebabkan perubahan

penjalaran moda di dalam serat optik yang mengakibatkan perubahan intensitas keluaran serat optik. Perubahan indeks bias yang terjadi pada serat optik dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 berikut.

$$\Delta n = -\frac{n_i^3}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \varepsilon \quad (2.14)$$

dengan :

n_i = indeks bias *core* atau *cladding*

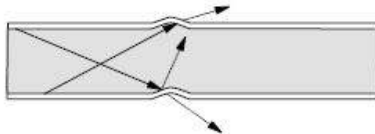
p_{11}, p_{12} = koefisien *strain* optic (0,12 dan 0,27)

p_e = koefisien serat optik efektif

ν = rasio poisson (0,17)

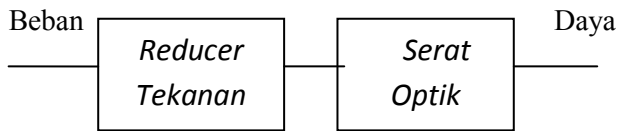
ε = *axial strain*

Jadi, jika serat optik diberi gangguan seperti beban maka akan terjadi *loss* dari moda yang menjalar pada serat optik. *Loss* inilah yang dimanfaatkan sehingga serat optik dapat digunakan sebagai sensor. *Loss* tersebut disebut rugi-rugi transmisi cahaya. Besarnya rugi-rugi yang ditimbulkan tersebut sebanding dengan berat beban yang dikenai pada serat optik atau sensor serat optik dan digunakan untuk mendeteksi beban kendaraan (Setiono, dkk., 2013).



Gambar 2.10Perambatan cahaya pada serat optik ketika dikenai beban (Putra,dkk., 2015)

Interaksi antar proses dan pembebanan pada serat optik dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Interaksi antar proses pembebanan pada serat optik

2.10 Sensor Beban Menggunakan Serat Optik untuk Sistem *Weigh-in-Motion* (WIM)

Sistem *Weight-in-Motion* adalah sistem pengukuran beban suatu kendaraan ketika kendaraan tersebut bergerak. Dengan menggunakan sistem WIM dalam melakukan pengukuran kendaraan, kendaraan tersebut tidak perlu berhenti sehingga pengukuran dapat dilakukan dengan efektif dan cepat. Hal tersebut merupakan salah satu keuntungan dari sistem WIM jika dibandingkan dengan pengukuran beban kendaraan yang dilakukan secara statis, dimana kendaraan tersebut harus berhenti. Saat sekarang ini sistem WIM terus dikembangkan dan dimanfaatkan dalam meningkatkan kualitas dari jalan serta sistem monitoring lalu lintas. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja dari pengukuran beban kendaraan menggunakan sistem WIM yaitu : Kecepatan, desain *axle* kendaraan, sistem *suspension*, dan suhu lingkungan.

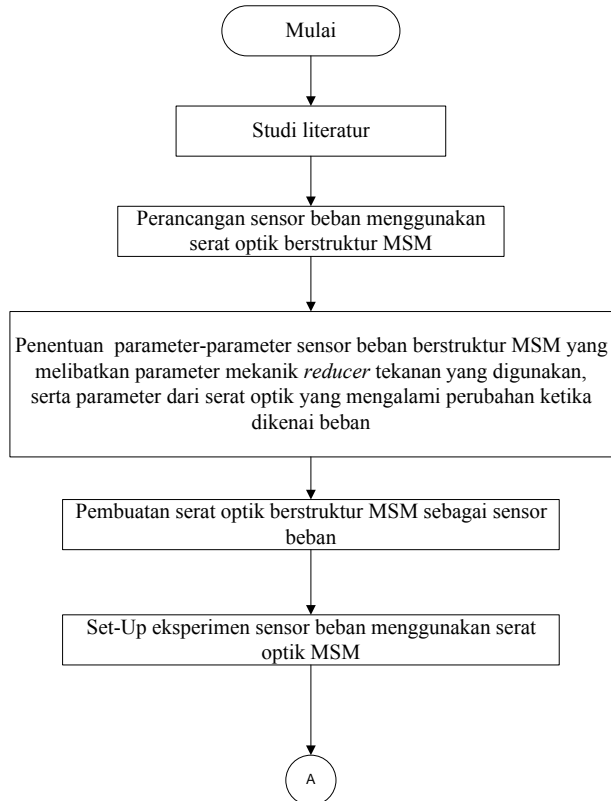
Sensor merupakan salah satu elemen pendukung sistem WIM ini. Sensor pada sistem WIM ini akan mengubah gaya vertikal yang diberikan oleh roda kendaraan ke permukaan sensor menjadi suatu besaran yang dapat diukur. Pada tugas akhir ini sensor yang digunakan adalah serat optik dengan struktur multimode-singlemode-multimode (MSM). Penggunaan serat optik sebagai sensor WIM memiliki banyak kelebihan yaitu sensor serat optik tidak terpengaruh oleh gelombang elektromagnetik, sehingga tidak akan mempengaruhi nilai pengukuran. Karena yang digunakan adalah sensor serat optik maka digunakan detektor berupa *optical power meter* (OPM).

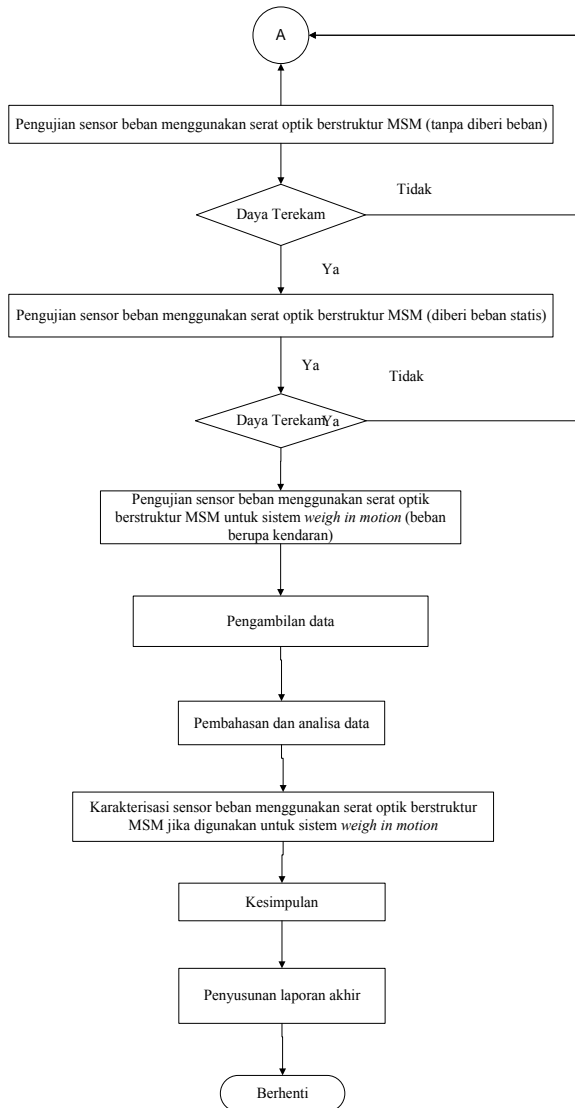
Maka daya keluaran yang terekam di OPM akan memberikan informasi tentang beban kendaraan yang melintasi sensor tersebut. Melalui data yang diperoleh dari OPM ini maka diperoleh perbedaan-perbedaan daya keluaran ketika kendaraan melewati sensor. Daya keluaran ini berbeda-beda untuk setiap beban berbeda yang melalui sensor serat optik. Hal ini karena ketika serat optik tertekan oleh beban dengan berat tertentu maka indeks bias pada serat optik akan berubah, dengan berubahnya indeks bias maka penjalaran modanya pun akan berubah begitu juga dengan konstanta propagasinya yang pada akhirnya akan menyebabkan perubahan intensitas keluaran dari sensor serat optik.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai prosedur pengerjaan tugas akhir. Pengerjaan dilakukan melalui metode eksperimental. Metodologi penelitian adalah serangkaian langkah-langkah kerja yang dilakukan dari awal sampai akhir secara berurutan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir. Secara umum tahap-tahap pengerjaan tugas akhir ini dapat dilihat pada diagram alir 3.1 berikut ini.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian tugas akhir

3.1 Studi Literatur

Langkah awal dalam melakukan penelitian tugas akhir ini adalah melakukan pembelajaran dan pemahaman teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan penelitian tugas akhir yang akan dilakukan. Sehingga dari studi literatur dapat diketahui prinsip dasar dari serat optik, aplikasi serat optik sebagai sensor beban, serat optik berstruktur *multimode-singlemode-multimode* (MSM), mekanika perubahan serat optik akibat diberikan tekanan sehingga terjadinya perubahan indeks bias dan penjalaran cahaya di dalam serat optik yang menyebabkan terjadinya *loss* atau rugi-rugi transmisi cahaya, skema perancangan eksperimen yang akan digunakan pada penelitian tugas akhir serta pengetahuan tentang penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.

Studi literatur merupakan kegiatan yang akan terus dilakukan dari awal sampai akhir penelitian. Beberapa literatur yang digunakan seperti buku, jurnal penelitian, artikel ilmiah, disertasi dan laporan tugas akhir yang pernah dilakukan yang berhubungan dengan penelitian tugas akhir yang akan dilakukan

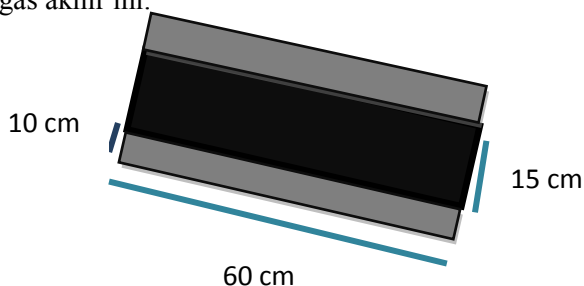
3.2 Perancangan Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur MSM

Perancangan sensor beban berstruktur MSM didasarkan pada kelebihan dan kekurangan struktur tersebut jika digunakan sebagai sensor secara umum. Struktur yang digunakan juga didasarkan pada ketersediaan alat dan bahan di Laboratorium Rekayasa Fotonika Teknik Fisika ITS.

3.3 Penentuan Parameter-parameter Sensor Beban Berstruktur MSM

Parameter-parameter yang ditentukan antara lain parameter mekanik reducer tekanan yang digunakan serta parameter dari serat optik yang digunakan. Untuk melakukan perancangan sensor serat optik *weigh in motion* (WIM)

diperlukan material penahan beban yang bertindak sebagai *reducer* tekanan terhadap serat optik supaya serat optik dapat menahan beban yang besar. Material penahan beban yang digunakan adalah plat baja. Plat baja digunakan karena material baja mempunyai modulus elastisitas sebesar 21×10^{10} Pa. oleh karena itu jika digunakan plat baja dengan modulus elastisitas tersebut masih mampu menahan beban sampai dengan 1500 kg tanpa menyebabkan pelat tersebut patah dan serat optik nya akan terlindungi. Gambar 3.2 merupakan desain pelat yang digunakan pada tugas akhir ini.



(a) Tampak atas



(b) Tampak samping

Gambar 3.2 Dimensi pelat besi (a) tampak atas (b) tampak samping

Besi yang digunakan merupakan jenis ST-37 ini didesain dengan dimensi 60 cm x 15 cm x 0,5 cm. Sedangkan serat optik yang digunakan terbuat dari bahan silika yaitu serat optik *multimode pigtail* jenis *graded index* dengan diameter *core/cladding*nya yaitu 50 μ m/125 μ m dan serat optik *singlemode* dengan diameter *core/cladding* sebesar 8,2 μ m/125 μ m. Serat optik berbahan silika memiliki modulus elastisitas sebesar 73 GPa dan memiliki flexural strength atau strength limit sebesar 1,1 GPa.

3.4 Pembuatan Serat Optik Berstruktur MSM sebagai Sensor Beban

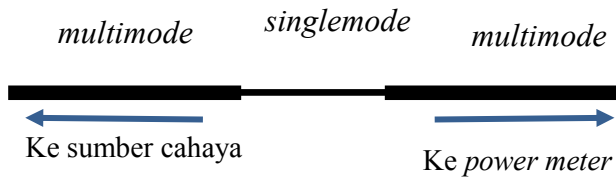
Pada tahap ini dilakukan penyambungan serat optik *Multimode-Singlemode-Multimode* dengan panjang 1 cm. Alat dan bahan yang diperlukan untuk merancang serat optik berstruktur MSM ini adalah sebagai berikut :

- a. Serat optik *multimode graded index pigtail*
- b. Serat optik *singlemode*
- c. *Optical Fiber Stripper*
- d. *Optical Fiber Cleaver*
- e. *Optical Fusion Splicer*
- f. Alkohol 99 %
- g. Pelat Baja St-37 dimensi 60 cmx15cmx0,5cm
- h. *Optical Power Meter*
- i. Sumber Cahaya dengan Panjang Gelombang 1550 nm

3.4.1 Penyambungan Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur *multimode-singlemode-multimode* (MSM)

Struktur serat optik MSM didapatkan dengan cara menyambungkan serat optik *singlemode* dengan serat optik *multimode* di kedua ujungnya. Untuk melakukan penyambungan maka jaket dari ujung serat optik harus dikupas dengan menggunakan *optical fiber stripper*. Setelah *coatingnya* dibuka maka dibersihkan dengan alkohol 99 % untuk menghilangkan sisa-sisa *coating* yang masih menempel.

Tahap selanjutnya adalah memotong ujung serat optik menggunakan *optical fiber cleaver*. Panjang serat optik yang akan dibuat harus dipotong se presisi mungkin sesuai dengan panjang yang telah ditentukan. Kedua ujung serat optik *singlemode step-index* masing-masing disambung dengan serat optik *multimode graded-index* menggunakan *optical fusion splicer*. Salah satu ujung serat *multimode* dihubungkan ke *optical power meter*, sedangkan ujung serat *multimode* yang lain dihubungkan ke sumber cahaya.



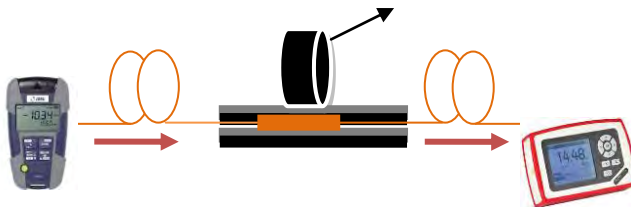
Gambar 3.3 Penyambungan struktur MSM

3.5 Set Up Eksperimen Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur MSM

Gambar 3.5 merupakan skema pengujian beban dinamis yang dilakukan. Beban yang digunakan adalah beban dinamis, dimana beban yang diukur dalam keadaan bergerak dan terdapat fungsi waktu serta kecepatan.



Gambar 3.4Skema sensor beban



Gambar 3.5 Skema pengujian beban dinamis

Pengujian dilakukan dengan menjepitkan serat optik pada material penahan beban yang digunakan. Pelat tersebut dikencangkan dengan menggunakan skrup. Beban dinamis yang digunakan adalah 4 motor dengan variasi berat. Masing-masing motor dilewatkan dengan 3 variasi kecepatan yaitu 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam. Posisi serat optik yang terkena tekanan adalah bagian *sensing* MSM yaitu *singlemode fiber*. Beban yang akan diukur bergerak sampai melewati sensor yang telah ditanam didalam pelat besi dengan kecepatan yang telah ditentukan. Daya keluaran diukur dengan menggunakan *optical power meter*. Sumber cahaya yang digunakan berupa laser dengan panjang gelombang 1550 nm dengan daya keluaran -6 dBm.

3. 6 Analisis Data dan Pembahasan

Pada bab ini akan dipaparkan penjelasan mengenai hasil perancangan sensor beban berstruktur MSM untuk sistem WIM yang telah dilakukan secara teori maupun eksperimen. Sehingga dari hasil analisis data dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan.

3.7 Perumusan Kesimpulan

Berdasarkan data-data yang telah diperoleh selama penelitian, analisis data dan pembahasan tentang fenomena yang terjadi selama proses penelitian tersebut, maka ditariklah kesimpulan sebagai jawaban atas permasalahan dan tujuan dari dilakukannya penelitian tugas akhir ini.

3.8 Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari yang memberikan detail kegiatan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan. Laporan ditulis secara runtut sesuai dengan pelaksanaannya dan sebagai bentuk pertanggungjawaban dari penelitian yang telah dilakukan. Setelah itu hasilnya akan disampaikan baik secara lisan maupun tulisan.

BAB IV

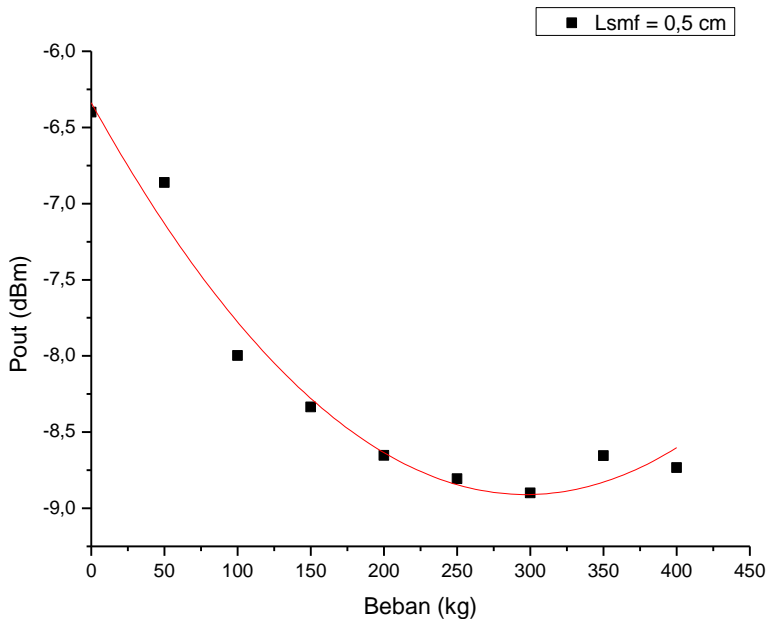
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Padababiniakan dijelaskan mengenaianalisa data pada perancangan dan pengujian sensor beban untuk sistem *weigh-in-motion*. Melalui pengujian dan analisa ini dapat diketahui performansi dari sensor beban yang dirancang. Dalam pengujian performansi sensor suhu serat optik berstruktur MSM ini teah dilakukan beberapa eksperimen. Untuk eksperimen pertama yaitu melakukan pembebanan statis pada serat optik MSM pada rentang 0-400 kg dengan interval 50 kg. Eksperimen kedua yaitu melakukan pengujian pada sensor beban serat optik berstruktur MSM dengan menggunakan beban dinamis. Eksperimen ketiga yaitu menerapkan kecepatan berbeda utuk masing-masing beban dinamis yang digunakan yaitu kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam ketika melewati sensor.

4.1 Hasil dan Analisa Pengujian Sensor Beban Serat Optik Berstruktur MSM Untuk Beban Statis

Sebelum melakukan pembebanan pada serat optik, perlu dilakukan pengukuran kestabilan sumber cahaya. Hal ini bertujuan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan sumber cahaya untuk stabil. Pengukuran daya keluaran dari sumber cahaya dilakukan dengan melewatkan cahaya pada serat optik *multimode-singlemode-multimode* (MSM) menggunakan *power meter* Thorlabs yang terhubung pada *software* PM100D pada komputer. Setelah melakukan pengukuran kestabilan sumber cahaya selanjutnya dilakukan pengujian dengan memberikan pembebanan secara statis. Pengujian sensor menggunakan beban statis penting untuk dilakukan terlebih dahulu sebelum melakukan pengujian menggunakan beban dinamis. Hal ini bertujuan untuk mengetahui respon sensor jika diberikan beban. Variasi panjang serat optik *singlemode* yang digunakan adalah 0,5 cm, 1 cm dan 1,5 cm. Pengujian sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM ini dilakukan dengan memberikan beban pada rentang 0-400 kg dengan interval 50 kg.

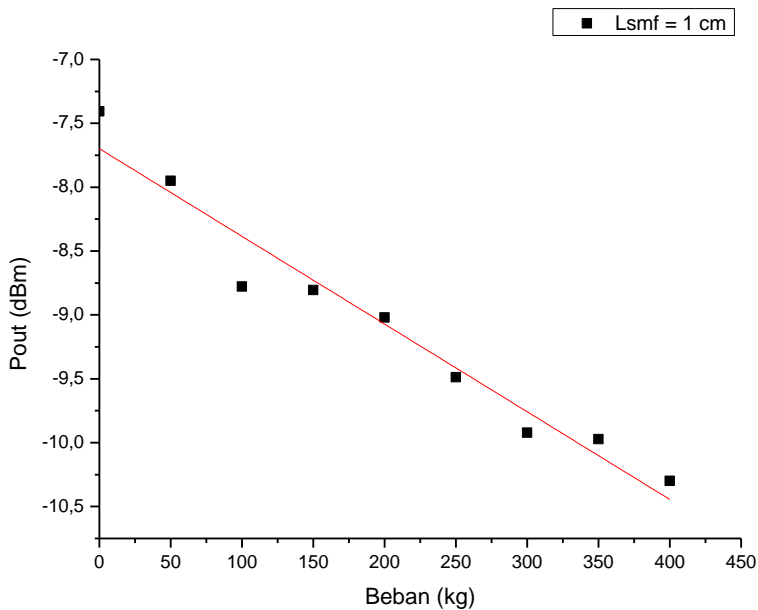
Pada grafik pengaruh pemberian beban dan perubahan daya keluaran pada panjang serat optik *singlemode* 0,5 cm dibawah ini dapat dilihat bahwa *trend* daya keluaran yang dihasilkan cenderung turun pada rentang beban 0-300 kg. Hal ini berarti semakin besar beban yang diberikan maka daya keluaran nya semakin kecil, berarti *loss* yang terjadi semakin besar ketika berat beban bertambah. Tetapi pada rentang beban 300-400 kg daya keluarannya cenderung mengalami kenaikan. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil pengujian beban statis pada serat optik MSM dengan panjang *singlemode* 0,5 cm

Selanjutnya dilakukan pembebanan secara statis dengan menggunakan serat optik dengan panjang *singlemode* 1 cm. Jika

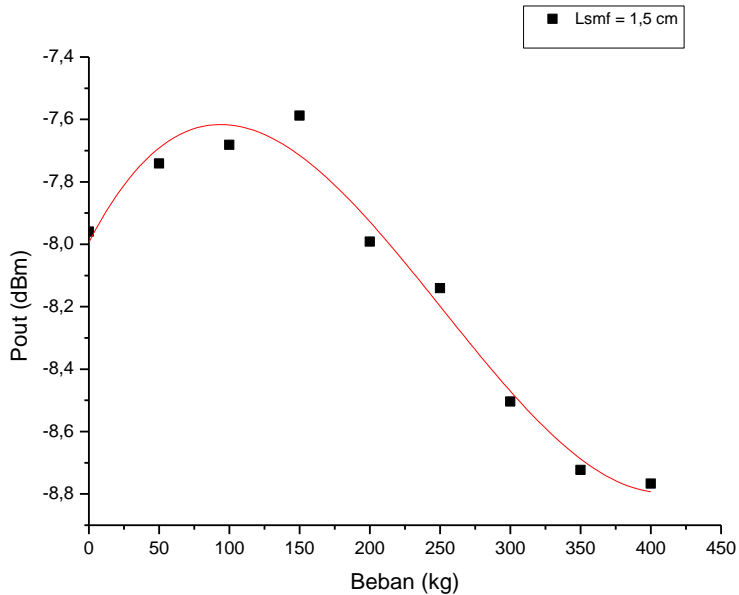
sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dengan panjang *singlemode* 1 cm ini diberikan beban pada *range* 0-400 kg maka daya keluaran pada sambungan *lead out* serat optik *multimode* akan memiliki perubahan trend daya yang semakin kecil jika beban yang diberikan semakin besar. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2 Hasil pengujian beban statis pada serat optik MSM dengan panjang *singlemode* 1 cm

Ketika sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dengan panjang *singlemode* sebesar 1,5 cm diberikan beban pada *range* 0-400 kg maka *trend* daya keluaran (*Pout*) pada sambungan *lead out* nya akan naik ketika diberikan beban pada rentang 0-150 kg. Hal ini berarti *loss* yang dihasilkan semakin kecil. Sedangkan trend daya keluaran menurun pada rentang

beban 200-400 kg. Hal ini berarti *loss* yang dihasilkan semakin besar seiring dengan semakin besarnya beban yang diberikan. Grafik hasil eksperimen dapat dilihat pada gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4.3 Hasil pengujian beban statis pada serat optik MSM dengan panjang *singlemode* 1,5 cm

Dapat dilihat pada gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 serat optik memiliki daya keluaran yang berbeda untuk panjang yang berbeda. Artinya panjang serat optik yang digunakan menentukan daya keluaran pada sambungan *lead out* sensor beban serat optik berstruktur MSM. Oleh karena itu pemotongan yang presisi sangat penting untuk dilakukan. Karena *self-imaging* yang terjadi pada serat optik ditentukan oleh pemotongannya. Jika pemotongan serat optik tepat dilakukan pada titik *self-imaging* maka akan dihasilkan daya keluaran yang maksimum. Karena interferensi yang terjadi antar moda- modanya menghasilkan

interferensi maksimum atau positif. Jika pemotongan panjang serat optik tidak dilakukan pada titik *self-imaging* maka akan dihasilkan keluaran yang minimum karena banyaknya *loss* yang terjadi akibat pemotongan yang tidak presisi. Artinya moda-moda yang menjalar pada serat optik mengalami interferensi minimum atau negatif.

Daya keluaran yang berbeda untuk masing-masing berat yang diberikan dikarenakan serat optik tersebut mengalami deformasi sewaktu dikenai beban yang mengakibatkan terjadinya perubahan indeks bias sesuai dengan persamaan 2.14 sehingga penjalaran moda-moda pun berubah yang mengakibatkan daya keluaran serat optik pun berubah sesuai dengan besarnya beban yang diberikan atau deformasi yang terjadi. Perubahan indeks bias akibat deformasi terjadi karena kerapatan bahannya pun juga berubah ketika dikenai beban. Kerapatan bahan tersebut berubah karena adanya pengaruh tekanan. Jika diberikan tekanan maka akan terjadi perubahan volume pada benda tersebut. Tekanan semakin tinggi maka akan terjadi penurunan volume yang akan menyebabkan kerapatannya naik. Jika kerapatannya tinggi maka indeks bias atau perambatan cahaya pada bahan tersebut juga akan semakin cepat. Hal ini akan berpengaruh pada perambatan moda-moda di dalam serat optik karena dengan adanya perubahan indeks bias core dan cladding maka sudut kritisnya pun juga akan berubah sehingga moda yang merambat pun juga akan ikut berubah. Hal ini menyebabkan daya keluaran juga akan berubah.

4.1.1 Hasil karakterisasi Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur MSM

Pada bagian ini akan dilakukan analisis dan pembahasan mengenai karakteristik statik sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM yang telah diuji menggunakan beban statis. Hal ini dilakukan untuk mengetahui performansi sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM. Karakteristik statiknya terdiri dari *range input*, *range output*, *span input*, *span output*, sensitivitas, dan linieritas. Karakteristik statik sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dapat dilihat

pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Karakteristik statik sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM

Karakteristik statik		Panjang serat optik <i>singlemode</i> (cm)		
		0,5	1	1,5
<i>Range</i>	Input Beban (kg)	0-300	0-400	150-400
	Output (dBm)	-6,400- -8,899	-7,4070- -10,298	-7,587- -8,766
Span	Input Beban (kg)	300	400	250
	Output (dBm)	2,499	2,891	1,179
Sensitivitas dBm/kg		0,0083	0,0072	0,0047
R^2		0,885	0,955	0,958

Persamaan garis linier untuk panjang serat optik *singlemode* 0,5 cm, 1 cm dan 1,5 cm masing-masing dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut .

Tabel 4.2 Persamaan garis sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dengan variasi panjang *singlemode*

Panjang serat optik <i>singlemode</i> (cm)	Persamaan garis
1 cm	$y = 0,008x - 6,703$
4,5 cm	$y = -0,006x - 7,697$
10 cm	$y = -0,004x - 6,956$

Berdasarkan eksperimen pengujian sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dengan 3 variasi panjang *singlemode* dihasilkan bahwa panjang serat optik *singlemode* yang memiliki sensitivitas paling tinggi adalah serat optik dengan panjang *singlemode* 0,5 cm. Hal ini ditunjukkan dengan besarnya selisih daya keluaran yang dihasilkan oleh serat optik dengan panjang *singlemode* 0,5 cm jika dibandingkan dengan panjang *singlemode* 1 cm dan 1,5 cm. Karena selisih daya keluaran yang besar maka sudah pasti sensitivitas yang dihasilkan akan tinggi. Dapat dilihat pada Tabel 4.1 bahwa serat optik dengan panjang *singlemode* 0,5 cm memiliki sensitivitas sebesar 0,0083 dBm/kg, serat optik dengan panjang *singlemode* 1 cm memiliki sensitivitas 0,0072 dBm/kg, sedangkan serat optik dengan panjang 1,5 cm memiliki sensitivitas sebesar 0,0047 dBm/kg. Nilai R^2 yang dihasilkan pun terletak antara 0-1. Dimana nilainya dikatakan lebih baik apabila semakin mendekati 1.

Dari tabel 4.1 juga dapat disimpulkan bahwa sensor yang dihasilkan memiliki *range* pengukuran dengan keluaran linier yang berbeda-beda untuk masing-masing panjang serat optik. Serat optik dengan panjang 0,5 cm memiliki *range* pengukuran dengan keluaran linier yaitu 0-300 kg. Serat optik dengan panjang *singlemode* 1 cm memiliki *range* pengukuran dengan keluaran linier yaitu pada rentang 0-400 kg. Sedangkan serat optik dengan panjang *singlemode* 1,5 cm memiliki *range* pengukuran dengan keluaran linier pada rentang 150-400 kg. Dari ketiga panjang serat optik yang digunakan sensor dengan *range* pengukuran paling besar adalah sensor dengan panjang *singlemode* 1 cm.

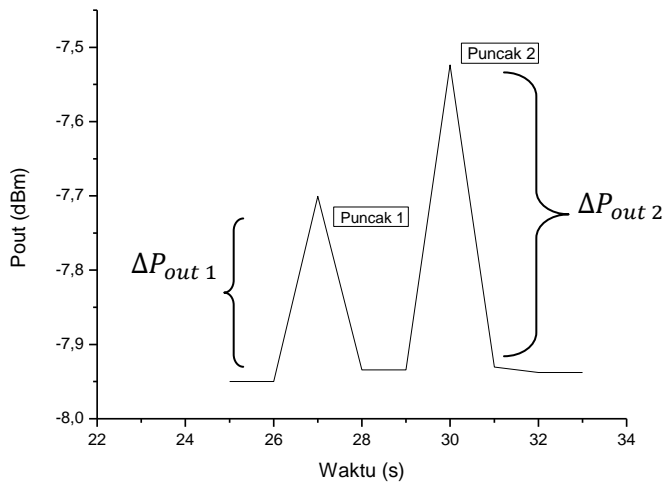
Dari hasil pengujian ketiga sensor tersebut maka dapat disimpulkan bahwa serat optik MSM memiliki sensitivitas yang tinggi untuk panjang serat optik 0,5 cm. Sesuai dengan penjalaran cahaya pada serat optik *multimode* yang dipengaruhi oleh moda *core* dan moda *cladding* maka jika serat optik *singlemode* yang digunakan panjang maka moda-moda yang ada pada *cladding*nya akan semakin mempengaruhi pola interferensi pada serat optik *multimode* sehingga sensor yang dihasilkan tidak homogen dan cenderung untuk menghasilkan nilai keluaran yang

tidak linier.

4.2 Hasil dan Analisa Pengujian Sensor Beban Menggunakan Serat Optik berstruktur MSM Untuk Beban Dinamis

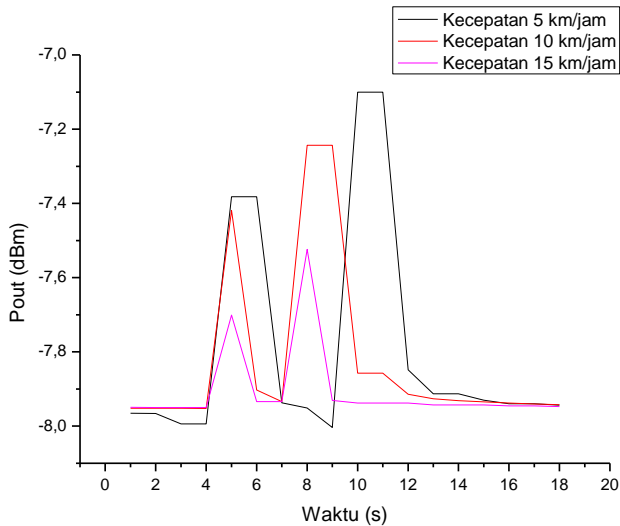
Setelah dilakukan pembebanan secara statis dan serat optik telah mampu merespon pembebanan yang diberikan. Selanjutnya dilakukan pengujian sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM untuk beba dinamis. Beban dinamis yang digunakan adalah kendaraan roda 2 dengan berat yang bervariasi. Serat optik yang digunakan adalah serat optik dengan panjang *singlemode* 1 cm.

Berikut merupakan grafik hasil pengukuran beban berjalan secara *realtime*. Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa ketika suatu beban dinamis menekan sensor serat optik berstruktur MSM maka akan terbentuk 2 puncak dengan ketinggian yang berbeda. Puncak-puncak tersebut dihasilkan akibat tekanan yang diberikan oleh roda depan dan roda belakang. Puncak 1 mewakili tekanan roda depan dan puncak 2 mewakili tekanan roda belakang. Setelah beban dinamis melewati sensor serat optik maka daya keluarannya menjadi stabil kembali. Hubungan daya keluaran akibat tekanan beban dinamis secara *realtime* dapat dilihat pada gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Hubungan antara daya keluaran dengan waktu dalam pengujian sensor beban berstruktur MSM

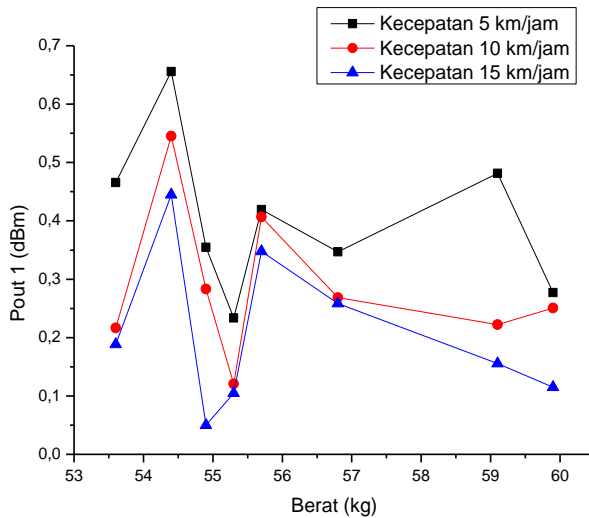
Dalam pengukuran beban dinamis maka kecepatan benda tersebut bergerak juga akan mempengaruhi daya keluaran pada serat optik. Maka pengujian dengan variasi kecepatan juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh perbedaan kecepatan terhadap daya keluaran sensor beban serat optik berstruktur MSM. Variasi Kecepatan yang digunakan adalah kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam. Berikut merupakan bentuk transmisi daya ketika sensor serat optik dikenai beban dengan berbagai variasi kecepatan. Dapat dilihat bahwa jika kecepatannya semakin tinggi maka daya keluarannya akan semakin kecil. Begitu juga sebaliknya jika beban dinamis bergerak dengan kecepatan yang rendah maka akan menghasilkan defleksi yang besar. Dapat dilihat pada gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5 Hubungan daya keluaran dengan waktu ketika beban melewati sensor dengan kecepatan yang berbeda

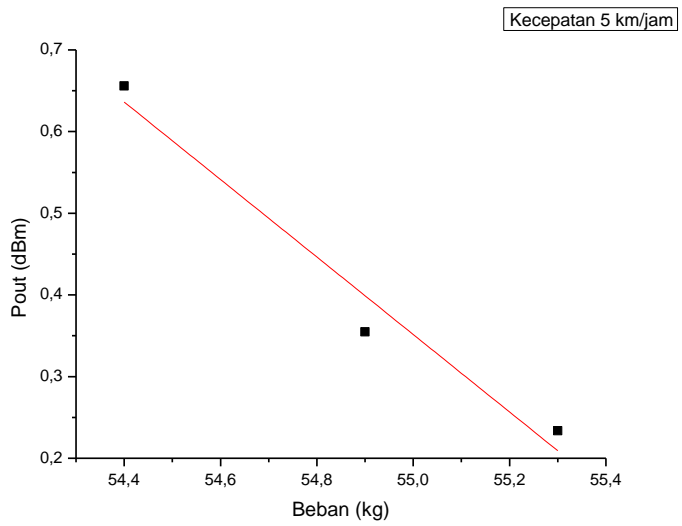
Dapat dilihat pada gambar 4.5 tersebut bahwa perbedaan defleksi yang dihasilkan dipengaruhi oleh waktu atau lamanya waktu kontak antara sensor dengan beban dinamis yang bergerak. Jika kecepatan benda bergerak yang tinggi maka waktu kontak pun akan kecil. Jika kecepatan benda bergerak rendah maka waktu kontak akan semakin besar.

Pada gambar 4.6 dibawah ini merupakan hubungan antara beban, daya keluaran dan kecepatan benda bergerak. Pada gambar 4.6 ini yang dianalisa adalah puncak/defleksi pertama atau perbedaan daya keluaran pertama ($\Delta P_{out 1}$).

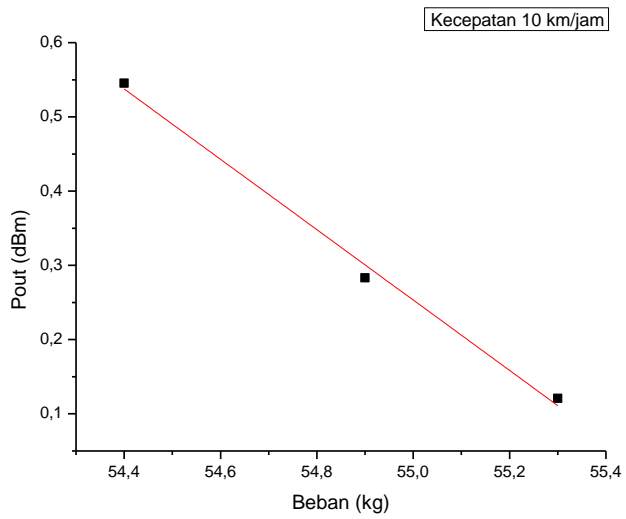


Gambar 4.6 Hubungan variasi berat dengan daya output untuk kecepatan yang berbeda (puncak pertama ($\Delta P_{out 1}$))

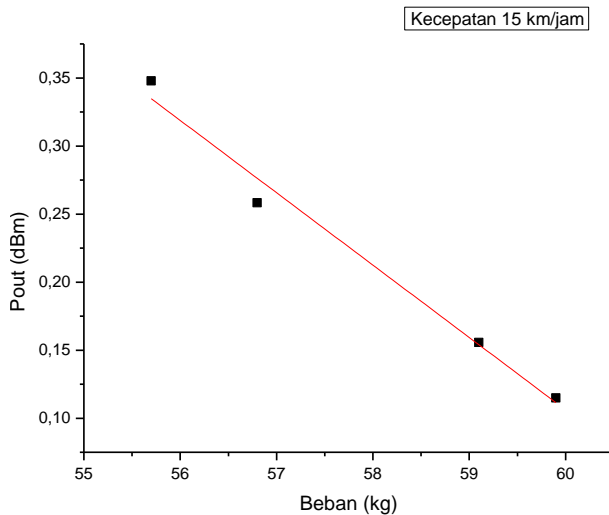
Dari hubungan beban dan daya keluaran tersebut untuk masing-masing kecepatan ditentukan sensor yang menghasilkan keluaran linier untuk dihitung karakteristiknya. Untuk kecepatan 5 km/jam didapatkan daerah dengan *range* beban yang menghasilkan keluaran yang linier dapat dilihat pada gambar 4.7 berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 *Range* beban yang menghasilkan perubahan daya linier untuk $\Delta P_{out\ 1}$ (a) kecepatan 5km/jam (b) kecepatan 10 km/jam (c) kecepatan 15 km/jam

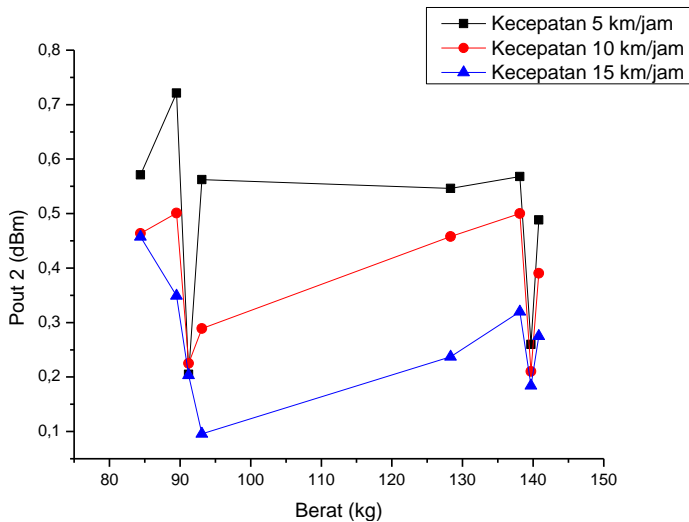
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa *range* beban yang dihasilkan masih kecil. Untuk kecepatan 5 km/jam dan 10 km/jam hanya 3 beban saja yang menghasilkan keluaran yang linier sedangkan untuk kecepatan 15 km/jam ada 4 beban yang menghasilkan keluaran yang linier. Selanjutnya akan dilakukan anlisir karakteristik sensor tersebut untuk kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam. Dapat dilihat pada Tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 Karakteristik sensor beban untuk puncak pertama ($\Delta P_{out\ 1}$)

Karakteristik statik		Kecepatan (km/jam)		
		5	10	15
Range	Input Beban (kg)	54,40-55,30	54,40-55,30	55,70-59,90
	Output (dBm)	0,6559-0,2338	0,5454-0,1209	0,3478-0,1148
Span	Input Beban (kg)	0,90	0,90	4,20
	Output (dBm)	0,4221	0,4245	0,2330
Sensitivitas dBm/kg		0,468973	0,471708	0,055464
R^2		0,968	0,995	0,984

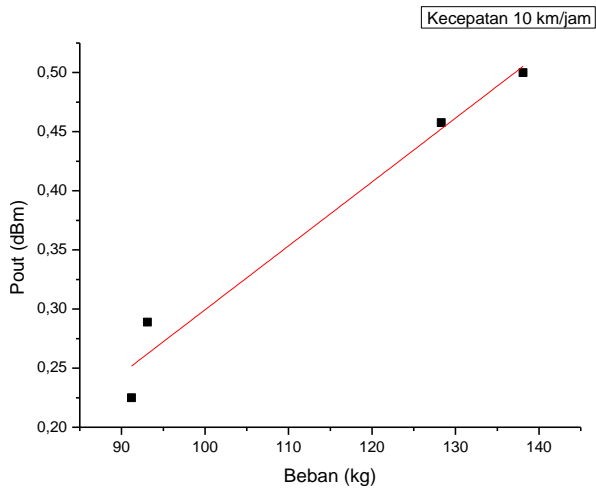
Pada tabel 4.3 tersebut dapat dilihat bahwa masing-masing kecepatan memiliki linieritas pengukuran pada rentang beban yang berbeda. Untuk kecepatan 5 km/jam dan 10 km/jam sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM ini memiliki linieritas pengukuran pada rentang beban yang sama yaitu 54,40 - 55,30 kg. Sedangkan untuk kecepatan 15 km/jam linieritas dihasilkan ketika beban berada dalam range 55,70-59,90 kg. Linieritas masing-masing untuk kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam adalah $y = -0,474x + 26,44$, $y = -0,473x + 26,31$ dan $y = -0,053x + 3,295$. Faktor korelasi yang dihasilkan pun ketika beban bergerak dengan kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam bernilai antara 0-1. Nilainya sangat mendekati 1.

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap defleksi atau perubahan daya keluaran ketika sensor dikenai roda belakang yaitu defleksi kedua ($\Delta P_{out\ 2}$). Dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut.

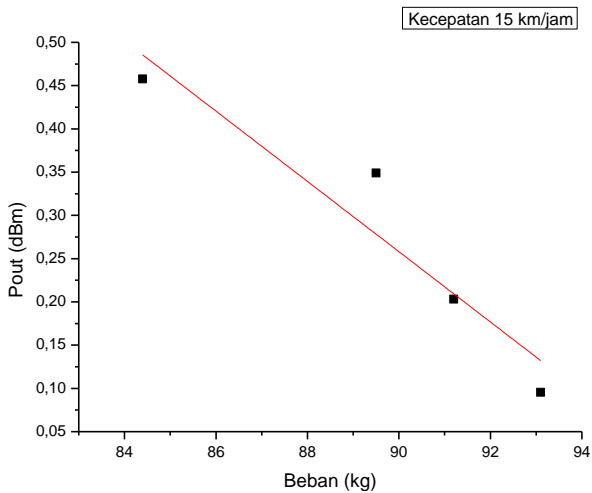


Gambar 4.8 Hubungan daya output dengan variasi berat untuk kecepatan yang berbeda (puncak kedua ($\Delta P_{out\ 2}$))

Untuk melakukan analisa karakteristik statik maka diambil sensor *range* beban yang memiliki pembacaan linier. Dapat dilihat pada grafik dibawah ini. Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa masing-masing kecepatan menghasilkan linieritas yang berbeda. Pada saat beban bergerak dengan kecepatan 5 km/jam sensor tidak menghasilkan pembacaan yang linier. Berbeda dengan pada saat beban bergerak dengan kecepatan 10 km/jam dan 15 km/jam. Dapat dilihat pada gambar 4.9 dibawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.9 Range beban yang menghasilkan perubahan daya linier untuk ΔP_{out} 2 (a) kecepatan 5km/jam (b) kecepatan 10 km/jam (c) kecepatan 15 km/jam

Karakteristik statik sensornya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.4 Karakteristik sensor beban untuk puncak kedua ($\Delta P_{out 2}$)

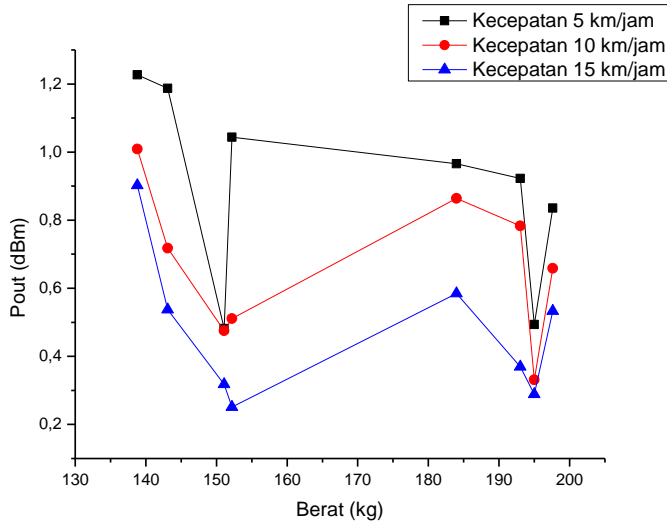
Karakteristik statik		Kecepatan (km/jam)	
		10	15
<i>Range</i>	Input Beban (kg)	91,20-138,10	84,40-93,10
	Output (dBm)	0,2250-0,4999	0,4576-0,0955
<i>Span</i>	Input Beban (kg)	46,90	8,70
	Output (dBm)	0,3630	0,3621
Sensitivitas dBm/kg		0,00586	0,04162
R^2		0,906	0,971

Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa ketika beban bergerak dengan kecepatan 10 km/jam sensornya menghasilkan *range* pengukuran yang linier pada rentang 91,20-138,10 kg dengan linieritas $y = -0,040x + 3,913$. Sedangkan untuk kecepatan 15 km/jam inier pada *range* bebean 84,40 – 93,10 kg dengan linieritas $y = 0,005x - 0,241$. Nilai R^2 yang dihasilkan juga berada pada rentang 0-1. Dimana nilai R yang bagus berada pada rentang ini. Pada tabel dpaat dilihat bahwa nilainya mendekati 1.

Dapat dilihat pada hasil karakteristik analisa puncak 1 da puncak 2 baik untuk kecepatan 5km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam linieritas sensor yang dihasilkan berada pada *range* beban yang kecil.

Selanjutnya dilakukan anlisa untuk jumlah puncak total yang dihasilkan oleh sensor ketika beban dinamis melewati

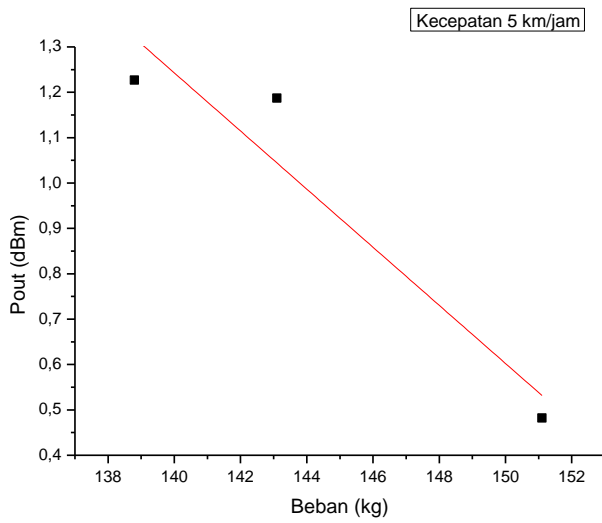
sensor tersebut. Hubungan variasi beban dengan variasi kecepatan untuk puncak pertama dan kedua ($\Delta P_{out 1}$ dan $\Delta P_{out 2}$) dapat dilihat pada gambar 4.10 berikut ini.



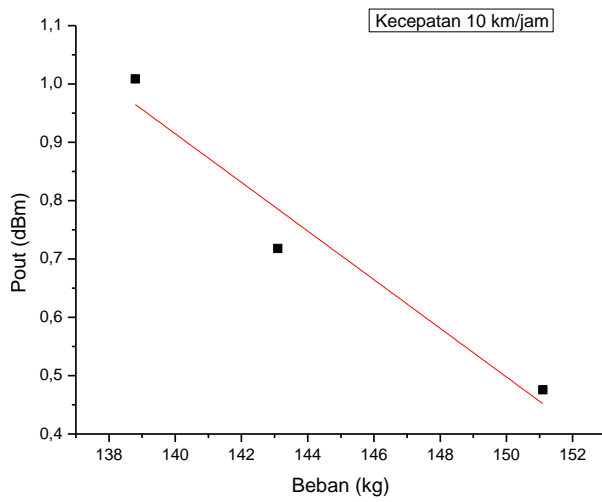
Gambar 4.10 Hubungan daya output dengan variasi berat untuk kecepatan yang berbeda (puncak pertama dan kedua ($\Delta P_{out 1}$ dan $\Delta P_{out 2}$))

Pada grafik diatas tersebut dapat dilihat bahwa sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM memiliki nilai perubahan daya keluaran yang cenderung turun pada *range* beban 138,8–152,2 kg kemudian naik ketika mencapai berat 184 kg, Sedangkan pada *range* beban 184–197,6 kg daya keluaran pada serat optik mengalami fluktuasi yang signifikan. .

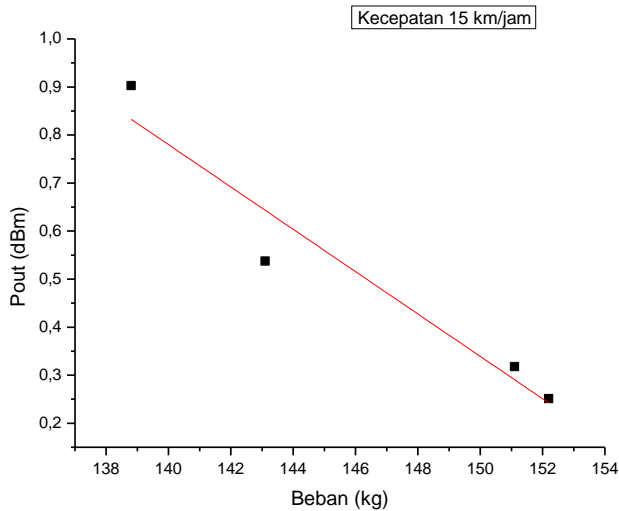
Total beban didapat dengan menjumlahkan berat beban roda depan dan roda belakang.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Range beban yang menghasilkan perubahan daya linier untuk total $\Delta P_{out\ 1}$ dan $\Delta P_{out\ 2}$ (a) kecepatan 5km/jam (b) kecepatan 10 km/jam (c) kecepatan 15 km/jam

Linieritas yang dihasilkan ketika beban bergerak dengan kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam adalah $y = -0,064x + 10,20$, $y = -0,036x + 6,048$ dan $y = -0,044x + 6,950$. Faktor korelasi yang dihasilkan pun mempunyai nilai yang besar yaitu mendekati 1. Berikut merupakan karakteristik statik sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM.

Tabel 4.5 Karakteristik sensor beban untuk pjumlah puncak total ($\Delta P_{out\ 1} + \Delta P_{out\ 2}$)

Karakteristik statik		Kecepatan (km/jam)		
		5	10	15
Range	Input Beban (kg)	138,8-151,1	138,8-152,2	138,8-152,2
	Output (dBm)	1,2267-0,482	1,0087-0,5111	0,9025-0,2513
Span	Input Beban (kg)	12,3	13,4	13,4
	Output (dBm)	0,7447	0,4976	0,6513
Sensitivitas dBm/kg		0,0605	0,0398	0,0486
R^2		0,910	0,931	0,934

Dari tabel 4.5 diatas dapat disimpulkan bahwa sensor serat optik berstruktur MSM ini jika digunakan sebagai sensor beban untuk sistem WIM masih belum bisa karena daya keluaran dengan range pengukuran yang linier pada rentang yang kecil.

Dari hasil pengujian hubungan kecepatan dengan beban diatas dapat dilihat bahwa jika kecepatannya semakin besar maka Perubahan daya nya semakin kecil. Begitupula sebaliknya jika kecepatannya semakin kecil maka perubahan dayanya akan semakin besar. Hal ini dikarenakan perbedaan waktu kontak antara beban dengan sensor. Karena adanya tekanan antara benda yang bergerak dengan sensor maka timbullah energi kinetik dan momentum akibat tumbukan sensor degan benda. Maka diketahui adanya faktor Δt yang menunjukkan waktu lamanya sensor mengalami penekanan. Semakin lama sensor ditekan maka transmisi daya nya maksimal, sehingga akan menghasilkan defleksi yang besar pula. Hal ini juga sesuai dengan hubungan kecepatan dengan waktu, dimana kecepatan berbanding terbalik

dengan waktu, sehingga apabila kecepatannya divariasikan maka akan terjadi perbedaan waktu sentuh antara sensor dengan beban, sehingga daya keluaranya juga berbeda.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Telah dilakukan perancangan sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM dengan menggunakan beban statis dengan rentang 0- 400 kg dan beban dinamis berupa 4 variasi kendaraan roda 2.
- b. Telah dilakukan 3 variasi panjang serat *singlemode* pada sensor beban menggunakan serat optik berstruktur MSM untuk pengukuran menggunakan beban statis yaitu 0,5 cm, 1 cm dan 1,5 cm. Pada pengukuran menggunakan beban statis diperoleh serat optik dengan sensitivitas paling tinggi adalah serat optik dengan panjang *singlemode* 0,5 cm yaitu 0,0083 dBm/kg dengan rentang pengukuran 0-300 kg.
- c. Ketika sensor serat optik berstruktur MSM dilewati oleh beban dinamis yaitu kendaraan roda dua maka akan terbentuk dua puncak. Puncak pertama mewakili roda depan dan puncak kedua mewakili berat roda belakang.
- d. Digunakan 3 variasi kecepatan yaitu 5 km/jam, 10 km/jam dan 15 km/jam. Kecepatan benda dinamis sangat mempengaruhi transmisi daya pada sensor serat optik berstruktur MSM untuk sistem *weigh-in-motion*. Apabila beban dinamis yang diukur bergerak dengan kecepatan tinggi maka akan menghasilkan defleksi atau perubahan daya yang kecil karena waktu kontak yang cepat antara sensor dengan benda begitupula sebaliknya.
- e. Pada pengukuran beban dinamis dilakukan 3 analisa yaitu defleksi ketika sensor dikenai roda depan, roda belakang dan total dari defleksi yang diakibatkan roda depan dan belakang. Pada defleksi roda depan atau puncak pertama sensitivitas sensor yang paling tinggi terjadi saat benda dinamis bergerak dengan kecepatan 10 km/jam yaitu

0,471708 dBm/kg. Tetapi pengukurannya berada pada rentang yang kecil yaitu 54,40-55,30 kg. Pada defleksi roda belakang atau puncak kedua sensitivitas sensor dihasilkan ketika beban dinamis bergerak dengan kecepatan 15 km/jam yaitu sebesar 0,04162 dBm/kg dengan *range* pengukuran 84,40-93,10. Sedangkan untuk total defleksi yang terjadi akibat roda depan dan roda belakang sensitivitas tertinggi diperoleh ketika sensor dilewati beban dinamis dengan kecepatan 5 km/jam yaitu 0,0605 dBm/kg dengan rentang pengukuran 138,8-151,1 kg.

- f. Sensor Beban menggunakan serat optik berstruktur MSM ini belum bisa langsung dimanfaatkan sebagai sensor beban untuk sistem *weigh-in-motion*.

5.2 Saran

Pada penelitian tugas akhir ini, terdapat beberapa hal yang perlu diperbaiki. Saran yang dapat diberikan penulis terkait dengan pengembangan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Pemotongan serat optik *singlemode* dan *multimode* menggunakan *cleaver* dengan skala mikro agar hasil potongan didapatkan lebih presisi.
- b. Melakukan pengujian dengan menggunakan serat optik dengan struktur yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Bentley, J. (1995). *Principles of Measurement Systems 3rd* . USA: Prentice Hall.
- Bolton, W. (2006). *Sistem Instrumentasi dan Sistem Kontrol*. Erlangga. Jakarta.
- Callister, William D dan Rethwisch, David G. 2009. *Material Science and Engineering : An Intrduction. Eight Edition*. John Wiley and Son, Inc: USA.
- Cheng, Lu, Hongjian Zhang, dan Qing Li. (2007). *Design of a Capacitive Flexible Weighing Sensor for Vehicle WIM System*. Sensors ISSN 1424-8220
- Jazi, Ahmad Safaai, Siamak A. Ardekani, dan Majid Mehdikhani. (1990). *A Low Cost Fiber Optic Weigh in Motion Sensor. Strategic Highway Research program* National Research Council. Washington, DC.
- Johnson, M. (2009). *Optical fibres,cable and systems*. ITU Telecommunication Standardization Sector.
- Li, Xiangyang, Chao Yang, Shifang Yang, dan Guozheng Li. (2012). *Fiber Optical Sensor: Basic and Application in Multiphase Reactors*. Sensors ISSN 1424-8220.
- Morshed, Ahmed Hisham. 2011. *Self Imaging in Singlemode- Multimode-Singlemode Optical Fiber Sensor. Proceeding of Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, Saudi International, Riyadh, Hal. 1-5.
- Mimbela, Luz Elena Y., dkk. (2003). *Application Of Fiber Optic Sensors In Weigh-In-Motion (WIM) System For Monitoring Truck Weighs On Pavements And Structures*. Final Report.

- Mufarrikha, A. (2013). *Perancangan Sensor Suhu Serat Optik Berstruktur Singlemode-Multimode-Singlemode untuk Rentang Suhu 200-300 C* . Surabaya.
- Nguyen, L , dkk,. (2008). *High Temperature Fiber Sensor With High Sensitivity Based On Core Diameter Mismatch*. Korea :OSA
- Pinet Eric. (2011). *Pressure Measurement With Fiber Optic Sensors : Commercial Technologies And Applications*. Kanada : SPIE
- Putra, Ardian dan Mohamad Ali Shafii. (2015). Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Andalas. Padang
- Puspita I. (2014). *Rancang Bangun Sensor Beban Berbasis Serat Optik Singlemode-Multimode-Singlemode Menggunakan High Density Polyethylen Sebagai Material Penahan Beban*. Surabaya.
- Rahmah,F. (2015). *Perancangan Sensor Beban Berbasis Mikrobending Pada Serat Optik Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) Dengan High Density Polyethylene (HDPE) Sebagai Bending Modulator*. Tesis Program Magister Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Saleh, Bahaa E.A. dan Malvin Carl Teich. (1991). *Fiber Optics, Fundamental of Photonics*. New York: Jhon Wiley & Sons, Incoorporation.
- Setiono, A,dkk. (2013). *Investigasi Serat Optik Untuk Aplikasi Sistem Pengukuran Berat Beban Berjalan (Weigh In Motion System)*. Banten
- Setiono, A dan Bambang Widadaymoko. (2013). *Desain Sensor Beban Kendaraan Menggunakan Teknik Mikrobending Serat Optik*. Telaah Jurnal Ilmu

Pengetahuan dan Teknologi Volume 30 (@) 2012 : 33-36.

Sun, An, dkk. (2012) All Fiber Optic Acoustic Sensor Based on Multimode-Singlemode-Multimode Structure. *Optik* 123(2012)1138-1139.

Szary, Patrick J., dkk. (2009). *Implementation of Weigh-in-Motion (WIM) System*. Final report FHWA-NJ-2009-001.

Urban, dkk. 2010. *Design of a Pressure Sensor Based On Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation*. *Jurnal Sensor* Vol.10 hal. 11212-11225.

Vijayaraghavan, Krishna, dkk., (2011). *Weigh-in-Motion (WIM) Sensor*. United States Patent Application Publication.

Villatoro, Joel dan David Monzon-Hernandez. (2006). *Low Cost Optical Fiber Refractive-Index Sensor Based on Core Diameter Mismatch*. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 3.

Waluyo, Tomi Budi. (2009). Karakteristik Rugi Kelengkungan Serat Optik Dengan Optical Time Domain Reflectometer Untuk Penggunaannya Sebagai Sensor Pergeseran Tanah. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia* Volume 9 No.2.

Wo, Jianghai, dkk. (2013). Sensitivity-enhanced Fiber Optic Temperature Sensor With Strain Response Suppression. *Optical fiber technology* 19 (2013) 289-292

Yin, Bin, dkk. (2016). *Investigation on a Compact in Line Multimode-Singlemode-Multimode Fiber Structure*. *Optics & Laser Technology*.

LAMPIRAN DOKUMETASI PENELITIAN

A. Tahap Pengujian Sensor Serat Optik Berstruktur MSM Menggunakan Beban Statis



Gambar 1. Pengujian serat optik menggunakan beban statis

B. Tahap Pengujian Sensor Serat Optik Berstruktur MSM Menggunakan Beban Dinamis



Gambar 2. *Set-Up* pengambilan daya



Gambar 3. Pengujian beban dinamis

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Lurah Panampung, Kab. Agam, Sumatera Barat pada tanggal 29 Juli 1994 dari ayah yang bernama Aditiawarman dan Ibu bernama Nelli Warti. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Halamn Panjang, Kec. Canduang, Kab. Agam, Sumatera Barat. Pada tahun 2007, penulis menyelesaikan pendidikannya di SDN 29 Kotohilalang. Tahun 2009, telah menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di MTsN IV Angkat Candung. Tahun 2012 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 1 Bukittinggi. Pada tahun 2016 penulis telah melakukan penelitian tugas akhir berjudul **Perancangan Sensor Beban Menggunakan Serat Optik Berstruktur Multimode-Singemode-Multimode (MSM) Untuk Sistem Weight-in-Motion (WIM)** di Jurusan Teknik Fisika ITS Surabaya.